



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

*Facultad de Ingeniería Industrial y Turismo
Departamento Ingeniería Industrial*

Trabajo de Diploma

Título: "Solución de distribución del azúcar crudo, para la producción de azúcar refino en la provincia de Villa Clara".

Autor: Ihosvany Alcina Cardoso

Tutor: Dr.C Roberto Cespón Castro

Cotutor: Cotutor: Ing Leonardo García Álvarez

Consultantes: Ing Francisco Reyes Santos

Ing Leyden Martínez Rodríguez

Curso 2010 – 2011

Santa Clara

“La grandeza está en la verdad y la verdad en la virtud”.
José Martí

Dedico mi primera obra de gran esfuerzo y envergadura a mis padres que tanto sacrificio han hecho durante todos estos años de mi carrera, a mi hermana, a mis abuelos que en tanto me han ayudado desde que empecé la universidad, a mi familia, a mi novia, porque a ellos les debo todo lo que soy, y han velado por mi formación y se han sacrificado mucho por mi futuro durante este largo periodo de mi vida.

- ✓ *A mis padres que siempre han sido mi inspiración profesional.*
- ✓ *A mis abuelos que siempre han velado por mi futuro.*
- ✓ *A mi novia Migdiala por su confianza, apoyo y amor.*
- ✓ *A mis tres grandes amigos Yaniel, José Víctor y Luis.*
- ✓ *A Cespón por haberme guiado hasta el final.*
- ✓ *A la Revolución que hizo realidad uno de mis sueños.*
- ✓ *A Leonardo, a Leyden, y a todo el personal de la empresa por la ayuda brindada.*
- ✓ *A mis compañeros de cuarto.*
- ✓ *A todos los profesores que tuve a lo largo de mis 5 años de estudio en la universidad.*
- ✓ *A todos los que de una forma u otra tuvieron que ver con la realización de esta tesis.*

A todos... Muchas Gracias.

Resumen

Resumen

El presente trabajo de diploma se realizó en el Grupo Empresarial Agroindustrial (GEA) de la provincia Villa Clara perteneciente al Ministerio del Azúcar (MINAZ). En el mismo se expone de forma clara y precisa un modelo matemático resuelto mediante la Programación Lineal que posibilita dotar a la red logística de distribución para la producción de azúcar refino en la provincia, de una herramienta científica capaz de validar o mejorar las soluciones de distribución que se tomen, teniendo en cuenta una serie de conceptos y técnicas a partir de la revisión de la literatura científica especializada. Ello facilitó el diseño del mencionado modelo y el hecho de que se obtuviese una solución lógica y representativa de la realidad, con una disminución en los costos.

Summary

Summary

The present diploma work was done in the Agroindustrial Management Group (GEA) in Villa Clara province belonging to the Sugar Ministry (MINAZ). A mathematician model is exposed in a clear and precise way. This model has been solved by a lineal programming that gives the possibility to the logistic network distribution to obtain refine sugar using scientific tools to improve the distribution solutions taking into account the concepts and techniques of the scientific specialized literature. This research work made easier the model design and the obtaining of a logical representative solution of the reality with lower costs.

Índice

| | |
|---|----|
| Índice | |
| Introducción | 1 |
| Capítulo I: “Marco teórico referencial” | 4 |
| 1.1 Introducción | 4 |
| 1.2 Logística | 4 |
| 1.3 Redes de distribución | 5 |
| 1.3.1 Rutas de distribución | 12 |
| 1.4 Métodos y herramientas empleados en el problema de distribución | 12 |
| 1.4.1 Métodos exactos | 12 |
| 1.4.2 Métodos de prueba y error (aproximados) | 14 |
| 1.4.3 Métodos heurísticos | 16 |
| 1.4.4 Técnicas metaheurísticas | 17 |
| 1.5 Etapas fundamentales de la modelación | 20 |
| 1.6 Conclusiones parciales | 23 |
| Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara” | 24 |
| 2.1 Introducción | 24 |
| 2.2 Caracterización del Grupo empresarial agroindustrial de Villa Clara | 24 |
| 2.3 Caracterización del sistema logístico de distribución de azúcar crudo en la provincia | 27 |
| 2.4 Identificación del problema | 29 |
| 2.4.1 Resumen del problema | 30 |
| 2.4.2 Recolección y análisis de la información | 30 |
| 2.4.3 Selección de la técnica a utilizar en la investigación | 30 |
| 2.5 Especificación matemática y formulación | 30 |
| 2.6 Resolución | 32 |
| 2.7 Verificación, validación y refinamiento | 33 |
| 2.8 Interpretación y análisis de los resultados | 33 |
| 2.9 Implantación, documentación y mantenimiento | 34 |
| 2.10 Conclusiones parciales | 34 |
| Capítulo III: “Desarrollo y aplicación del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara” | 36 |
| 3.1 Introducción | 36 |
| 3.2 Descripción del problema | 36 |
| 3.2.1 Resumen del problema | 36 |

Indice

| | |
|---|----|
| 3.2.2 Obtención de la información | 36 |
| 3.2.3 Selección de la técnica a utilizar en la investigación..... | 36 |
| 3.3 Construcción del modelo matemático | 37 |
| 3.4 Solución | 44 |
| 3.5 Verificación, validación y refinamiento..... | 44 |
| 3.6 Interpretación y análisis de los resultados..... | 44 |
| 3.7 Implantación, documentación y mantenimiento..... | 45 |
| 3.8 Conclusiones parciales..... | 45 |
| Conclusiones generales..... | 46 |
| Recomendaciones..... | 47 |
| Bibliografía | 48 |
| Anexos | |

Introducción

Introducción

La realidad empresarial requiere de nuevos conceptos y puntos de referencias orientados a las características del servicio en función de la percepción del cliente. En este sentido, han tomado una connotación peculiar los enfoques de procesos y logístico. Se viven momentos muy complejos, donde el ritmo de recuperación, consolidación y desarrollo de la economía cubana es parte de un proceso integral de perfeccionamiento de todas las instituciones, de toda la sociedad, de su sistema empresarial, con el propósito de mantener y desarrollar las conquistas alcanzadas. Esto trae consigo la capacidad de adoptar en cada momento, las prácticas, los métodos y las técnicas que mejor satisfagan los requerimientos y que tengan en cuenta las circunstancias y exigencias concretas del entorno. Muchos factores externos a las empresas están moldeando hoy su comportamiento competitivo. La globalización, la conformación de nuevos mercados regionales, las mayores presiones derivadas de la agudización de la competencia por el mercado, son algunos de los factores que han impulsado a las empresas a mejorar su productividad y competitividad, las cuales están enfrascadas en tener una posición de avanzada en el mercado y se esfuerzan cada vez más por defenderla.

Relacionado con estas tendencias contemporáneas las empresas cubanas de cualquier sector se ven obligadas a incrementar su calidad y a realizar un amplio estudio de su sistema logístico con vista a detectar cualquier tipo de deficiencia tanto actual como futura que impida en cualquier medida el logro de sus objetivos trazados.

Para el logro de la competitividad es necesario buscar herramientas que permitan, de una manera rápida, situar a las entidades en posición de disminuir los costos. La actualidad impone retos a los planes de cualquier empresa, sea esta productiva, comercial o de servicio, la economía no permite el derroche por lo que se buscan constantemente formas de reducir los costes y en ello tiene elevada importancia la situación existente en el país con respecto al azúcar y su importancia tanto en el mercado internacional como el nacional, resulta vital para la economía cubana desarrollar alternativas o métodos de distribución que permitan a los centros de obtención del producto y a toda su cadena de distribución incrementar las cantidades finales mediante la reducción de tiempos de parada en algunas fábricas de azúcar y el congestionamiento de insumos en otras. De lo que se trata es de dotar el proceso de distribución con un verdadero enfoque logístico que abarque la provincia Villa Clara como un todo y no los centrales azucareros de manera aislada. En consecuencia, de lo que se trata es de buscar vías para que se cumplan los planes de azúcar refinado con el menor costo posible, para lo cual resulta conveniente utilizar herramientas matemáticas que validen o mejoren las soluciones de distribución que se adoptan en la actualidad.

Introducción

La red actual de distribución del azúcar crudo en la provincia de Villa Clara, desde los centrales hasta los centros de refinamiento se realiza desde hace varios años sobre la base de la experiencia del personal encargado de ello. Aun cuando se trata de personal de mucha experiencia, es importante el empleo de otros métodos que permitan modelar el problema de distribución de azúcar crudo para obtener azúcar refino. Como fue planteado, la modelación del mencionado problema mediante otras herramientas como las matemáticas deben permitir validar o mejorar, la manera actual en que se realiza la distribución, todo lo cual constituye la **situación problemática** de la presente tesis.

Dada la situación problemática anteriormente planteada, se define como **problema científico**: La forma actual en que se realiza la distribución de azúcar crudo a las refinерías de la provincia Villa Clara, donde predomina la experiencia del personal que lo realiza, requiere de una validación o mejoramiento, utilizándose otras herramientas para la modelación del problema de distribución planteado como es el caso de los métodos de la investigación de operaciones.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se formula la **hipótesis de investigación** siguiente:

El empleo de la programación lineal en la modelación del sistema de distribución para la producción de azúcar refino en la provincia Villa Clara, permitirá validar o mejorar las soluciones de distribución que actualmente se obtienen sobre la base de la experiencia del personal encargado de ello.

Esta hipótesis quedará validada si al finalizar el trabajo se logra obtener:

- La modelación de la red logística de distribución para la producción de azúcar refino en la provincia, dotada de un enfoque logístico, empleando la programación lineal.
- El modelo diseñado permite obtener soluciones lógicas que demuestren que constituye una versión representativa del sistema real.
- La comparación de los resultados reales con los arrojados por el modelo, permiten afirmar que el mismo constituye una forma de validar o mejorar las soluciones de distribución actuales.

El **objetivo general** de la investigación es desarrollar un modelo de distribución utilizando la programación lineal, que permita dotar de un enfoque logístico la red de distribución para la producción de azúcar refino en la provincia de Villa Clara.

De este objetivo general se derivan los **objetivos específicos** siguientes:

1. Construir el marco teórico - referencial de la investigación, derivado de la consulta de la literatura científica internacional y nacional más actualizada sobre las temáticas: logística, redes de distribución, y métodos empleados para el problema de distribución.

Introducción

2. Modelar la red de distribución para la producción del azúcar refinado en la provincia de Villa Clara.
3. Aplicar el modelo concebido en la red de centrales azucareros de la provincia Villa Clara, con la información correspondiente a la zafra azucarera del 2011.

Para cumplir los objetivos, la investigación se estructuró de la forma siguiente:

- Introducción, donde se aborda el tema desarrollado, se caracteriza la situación problemática, se fundamenta el problema científico y la hipótesis de investigación.
- Capítulo 1, aborda el marco teórico-referencial necesario para la investigación, con información actualizada del tema de investigación.
- Capítulo 2, en el que se define el procedimiento o conjunto de pasos a seguir para el desarrollo del modelo matemático a aplicar.
- Capítulo 3, se muestran los resultados de la aplicación del mismo.

Finalmente se incluyen un grupo de conclusiones y recomendaciones, así como una recopilación de todas las bibliografías referenciadas, y un conjunto de anexos de necesaria inclusión como complemento de los análisis realizados.

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

1.1 Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo fundamental servir de soporte teórico de la investigación realizada. En el mismo se recogen de forma sintética definiciones y criterios presentados por diferentes autores, relacionados con los temas tratados en el desarrollo de la investigación. Este capítulo, para una mejor organización y comprensión de los temas tratados se ha subdividido como se muestra en la siguiente figura.

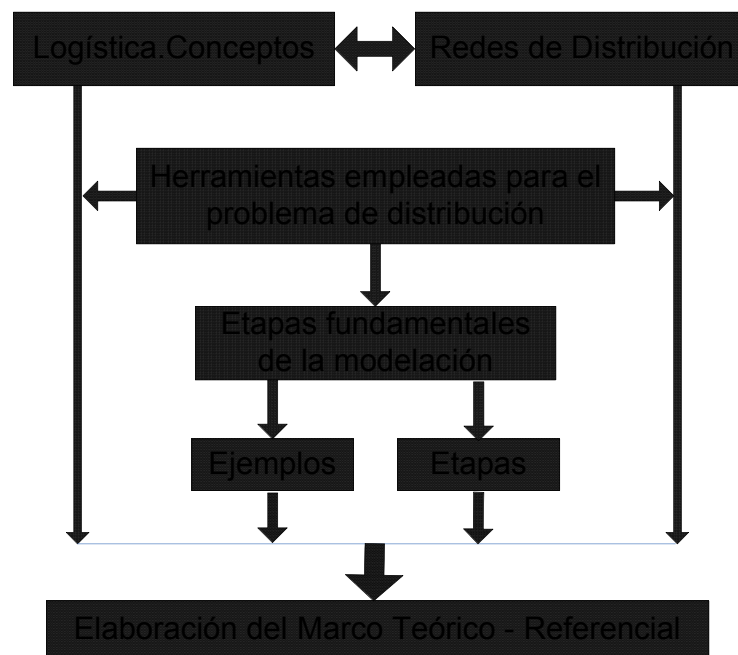


Figura 1.1: Hilo conductor del marco teórico referencial. *Fuente:* (Elaboración propia)

1.2 Logística

La actividad de manipulación y almacenamiento de las cargas es tan antigua como la humanidad misma, y surge desde que el hombre necesita conservar los granos hasta la próxima cosecha (Comas Pullés, 1996).

Algunas definiciones de logística basado en la literatura científica y especializada se pueden constatar en el **(Anexo1)** de esta investigación, no obstante, existen diversas definiciones y conceptos aportados por otros autores y que poseen gran similitud con las definiciones expuestas en el anexo 1, dentro de ellos destacan, Conejero González (1997), Santos Norton (1997) y Comas Pullés (1998), que llegaron a las mismas concepciones comenzando por caracterizar la logística como un sistema, con subsistemas, variables, interrelaciones internas y externas, funciones y objetivos. En este esquema y según la propia fuente, se indica la vinculación estrecha de la logística con la disminución de los costos y el incremento del

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

servicio al cliente. También se vinculan todos los subsistemas logísticos con los flujos y el entorno de las empresas y se refiere a que este esquema es aplicable a cualquier empresa.

Mediante el análisis de estos criterios se evidencia que la logística es el proceso que garantiza las actividades de diseño y dirección de los flujos material, informativo y financiero, desde sus fuentes de origen hasta sus destinos finales. Estas actividades deben ejecutarse de forma racional y coordinada con el objetivo de proveer al cliente los productos y servicios en la cantidad, calidad, plazos y lugar demandados, con elevada competitividad.

De acuerdo con un análisis de todas las anteriores definiciones sobre la logística y teniendo en cuenta el entorno cubano, la investigación se apoya sobre el criterio emitido por Knudsen González (2005), ya que abarca toda las partes correspondientes a la gestión de la cadena de suministro y enuncia como la misma debe añadir valor al cliente de forma segura para el medio ambiente.

Tomando en cuenta el conjunto de definiciones anteriormente expuestas por los diferentes autores se puede decir que: La logística es un proceso que garantiza y controla los flujos de materiales, materias primas (insumos o productos elaborados), finanzas e información a lo largo de la red logística, desde el suministrador hasta el cliente con el objetivo de satisfacer los requerimientos de los mismos con elevada competitividad.

En general se afirma que la Logística de la etapa contemporánea constituye una herramienta que aporta a la empresa una ventaja competitiva, que las distingue y puede situarla en la cumbre del mercado de bienes y servicios, pero para lograr esa competitividad se necesita tener una buena organización en la red logística de cualquier empresa, por ello es importante conocer que son las redes logísticas.

1.3 Redes de distribución

Según el criterio expresado por varios autores como, (Ballou, 1991, Udem ,2000 y Blanchard ,1995; citados en Marrero Delgado, 2001), el concepto de red abarca todo tipo de actividades logísticas a cualquier nivel, convirtiéndose, por ello, en el rasgo unificador de todas las áreas de la logística y en el marco conceptual de trabajo para la gestión de las mismas.

En esencia, la red logística, es el modelo de la trayectoria del flujo material y el flujo informativo asociado, desde los proveedores a las fábricas, desde estos a los almacenes de distribución y de ellos a los puntos de ventas. Incluye las decisiones de los niveles de inventario en la red logística y la evaluación de las diferentes variantes de circulación de los materiales y los diferentes niveles de inventario en los eslabones de la red (Marrero Delgado, 2001).

De acuerdo con Marrero Delgado (2001) y según Ballou (1991), el interés de la logística, está centrado en la planificación y control de una red de distribución que permita a los productos de

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

su organización, tras una petición de los clientes, estar a tiempo en el sitio adecuado. El diseño de esta red tiene como metas el construir una configuración de fábricas, puntos de ventas y almacenes que permita, junto con el establecimiento de los niveles de inventario, los servicios de transporte y de un sistema de procesamiento de información adecuados, obtener un balance óptimo entre las metas y los costos asociados con la creación y operación de la red.

Con vistas a una comprensión adecuada de las redes de distribución se hace necesario aclarar que las redes cumplen la función principal de comunicar a varios puntos.

De acuerdo con Agra Martínez (2008), con el objetivo de mantener la conexión entre los agentes que componen los sistemas de transporte, las redes de distribución adquieren una importancia decisiva en la determinación del coste total de la distribución. Éstas surgen de la necesidad de conectar y poder transportar bienes a sus destinatarios. Su tipología y estrategias de explotación son muy variadas, y se deben adaptar, en cada caso, al ámbito comercial al respecto.

La configuración y la facilidad de adaptación de las redes al espacio real en el que se trabaja determinarán el éxito o fracaso de un sistema de transportes. El hecho que una red de distribución no esté adecuadamente configurada para un escenario en concreto puede ocasionar distorsiones en los resultados de los estudios y de bien seguro que causará un incremento significativo de los costes asociados a la distribución y una reducción de beneficios por parte de las empresas que las explotan (Agra Martínez, 2008).

Las empresas tienen que tomar una serie de decisiones estratégicas en relación a los canales de distribución y pueden distribuir o vender empleando varios de ellos. Al conjunto de canales de distribución de las empresas se conocen como red de distribución. En la fase de distribución, la mercancía puede ser transportada con una gran variedad de modos de transporte (por ferrocarril, transporte aéreo, marítimo, fluvial o por carretera) y puede realizar varias paradas en almacenes o nodos de cambio modal hasta llegar a su destino final. La configuración de la red de transporte condiciona los costes de distribución de la mercancía así como la planificación y organización temporal de la cadena de suministro de los productos al mercado. En las redes de distribución tradicionales, la empresa de producción organiza y gestiona su propia red de transporte, de forma que realiza los envíos de transporte desde un número limitado de sus plantas de producción hasta cada cliente o mercado por lo que puede ser factible utilizar vehículos de gran capacidad y con costes unitarios menores (Estrada M, 2007).

Según Estrada M (2007), dentro de la ingeniería del transporte y la logística, existen 3 tipologías básicas de redes de distribución, según la mercancía, el modo de transporte o la

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

disposición de los puntos generadores de demanda. Estas 3 tipologías son el peddling, el many-to-many y el H&S, las cuales que se comentarán a continuación, ver (figura 1.2).

Peddling: El peddling se caracteriza por una estructura de pocas rutas, donde el alto número de paradas adquiere mucha importancia. Aplicada bien, es flexible, en el sentido que a una ruta se le pueden asignar paradas cercanas sin un coste excesivo. Es una estrategia indicada para escenarios con un número reducido de vehículos y con un coste asociado a cada parada relativamente bajo. Se suele aplicar esta tipología de redes a servicios de correos y paquetería, o a paradas de líneas de autobús urbano.

Many to many: Red de envío directo, se considera una estrategia muy “primitiva”, en el que todos los puntos de la red están conectados con todos, y se sirven entre ellos directamente. Ello comporta un número desorbitado de rutas que solamente tienen origen y destino.

Tendría sentido adoptar esta tipología si los costes que se desprenden del vehículo que los sirve son muy bajos o si los puntos generadores de demanda son lo suficientemente potentes como para llenar los vehículos de distribución.

Otra posible aplicación sería para equipos de emergencia, en el que el tiempo de entrega tiene un carácter crucial, como casos de paquetería urgente o servicios de ambulancia.

Hub & Spoke: H&S es una tipología de red caracterizada por la existencia de centros de consolidación llamados hubs donde la carga se manipula, se clasifica y se agrupa para distribuirla en otras rutas de forma que desde el punto de vista global del sistema se reduzcan los costes y se permita la entrega en un tiempo adecuado.

Las principales ventajas del sistema son el incremento de la frecuencia de los transportes, el incremento de la ocupación, la reducción del tiempo total del viaje y el ser una tecnología de menor coste unitario. Son ejemplos de esta tipología los tráficos aéreos o centros de concentración de mercancías, como lo son los CIMs.

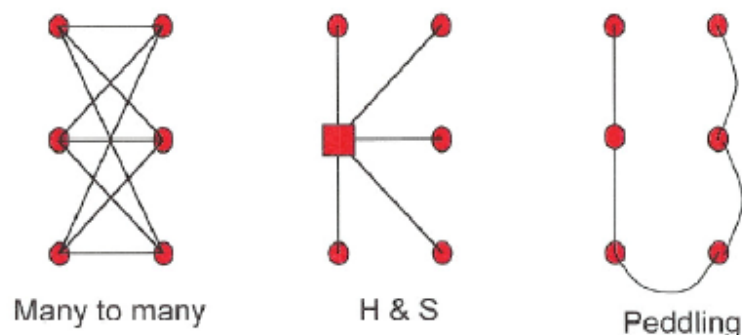


Figura 1.2: Algunos tipos de redes de distribución. *Fuente:* Tomado de Estrada M (2007)

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

Según el propio autor, las tipologías descritas anteriormente no tienen por qué seguirse estrictamente y se admiten fusiones y mezclas de propiedades de tipologías de red distintas, como H&S permitiendo algún envío directo o H&S añadiendo el concepto de routing característico del peddling. A continuación se exponen las dos estrategias básicas de envío, diferenciadas en que parte del proceso de distribución recae la importancia.

Una metodología tipo commodity o multicommodity considera solamente los puntos origen y destino de la mercancía estudiada, mientras que ignora la ruta escogida. Este punto de vista facilita el cálculo pero impide conocer la ruta exacta que se ha utilizado; cosa que implica que no puedan aplicarse posibles optimizaciones basadas en paradas múltiples. Por otra parte, tratar un problema desde el punto de vista de routing provoca que la ruta escogida, y sus paradas, alcancen una importancia meridiana frente al origen y destino de la propia ruta.

El empleo o no de la estrategia depende de la importancia relativa que tenga la mercancía respecto de la propia ruta y del origen y destino final del trayecto.

De acuerdo con Pachares Nolivós et al (2009), una red de distribución es: “una colección finita de nodos (cada uno de los cuales representa, una planta, almacén o tienda); un arco indica la posibilidad de enviar bienes entre los dos nodos conectados por el arco”, también se puede considerar que una red de distribución es la administración racionalizada del stock, gracias al amplio rango de servicios de distribución, lo cual sirve para:

- Reducir costos de aprovisionamiento de productos
- Incrementar el capital circulante
- Reducir los costos asociados con el almacenamiento, transporte y reposición de sus componentes.

Toda red de distribución está conformada por los siguientes elementos:

- Nodo, círculos de una red de distribución utilizada para representar una planta, almacén o tienda al menudeo.
- Nodo de suministro, nodo desde el cual los bienes se van a enviar.
- Nodo de demanda, nodo que va a recibir los bienes para cumplir con demandas conocidas.
- Nodo de trasbordo o intermedio, un nodo que recibe bienes desde otros nodos para su redistribución.
- Arcos, línea de una red de distribución que conecta un par de nodos; se lo utiliza para representar una ruta válida desde el nodo de origen hasta el nodo de distribución.

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

La estructura de una red de distribución de una red logística se integra principalmente por almacenes y centros de distribución, determinar la capacidad, ubicación y la cantidad de estos es de vital importancia.

La distribución se define como el conjunto de relaciones comerciales, financieras y jurídicas que tienen el fin de dar valor de lugar, tiempo, posesión a los productos de los proveedores de acuerdo a las expectativas de los clientes, además ésta es atendida con prioridad por la importancia que reviste para la actividad comercial y la competitividad de la empresa, ya que garantiza que los productos lleguen al lugar preciso, en el momento oportuno y al menor costo posible, aporta por lo tanto, ventajas competitivas relevantes, y su objetivo esencial es garantizar el nivel de servicio deseado por los clientes (Torres Gemeil & Daduna & Mederos Cabrera, 2003).

Algunos autores como González González et al (1998), Sáez Mosquera et al (2000), Garza Ríos (2001), han tratado de una u otra forma en varios de sus trabajos investigativos lo concerniente a esta importante área o subsistema de la cadena de suministro, coincidiendo en la importancia que posee la distribución como elemento esencial que permite a las empresas o entidades hacer llegar sus productos a los clientes siendo capaces de cumplir con sus requerimientos.

Por otra parte Cespón Castro & Auxiliadora Amador (2003) plantean que el problema de la distribución de uno o varios productos a varios puntos a través de múltiples rutas posibles a formar, dependiendo de las distancias entre estos y la distancia desde cada uno de ellos a un centro de distribución, constituye un problema típico en el campo de la logística, por lo que este problema ha cobrado elevada importancia, reconociéndose cada vez más su influencia sobre la rentabilidad empresarial. Por ello, es imprescindible describir cómo se compone la distribución del producto, de acuerdo con estos dos autores, se pueden identificar la existencia de cuatro subsistemas claves:

- 1) Gestión de inventarios
- 2) Gestión de almacenaje.
- 3) Gestión de pedidos
- 4) Gestión de transporte

De acuerdo con Cespón Castro & Auxiliadora Amador (2003) estos cuatro subsistemas deberán estar representados dentro de la jerarquía directiva de manera que se posibilite la definición de la política de distribución, relacionada con los niveles tácticos y estratégicos de la jerarquía de las decisiones, a partir de la cual se ejecutara un proceso operativo que involucre estos subsistemas y que culminara con la entrega del producto al cliente.

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

Gestión de Inventarios

Asumiendo un sistema de “empuje” (push), en el cual las cantidades a distribuir y las características del objeto a distribuir estarán dadas por el eslabón de la cadena logística que le precede, y tomando como partida la política de distribución definida en los niveles táctico y estratégico de la toma de decisiones de la alta dirección, los elementos de este subsistema serán:

- Cantidades a almacenar: Se calcula el tamaño del lote a almacenar de acuerdo al criterio que se haya seleccionado.
- Ciclo de reaprovisionamiento de los productos: Se obtiene la frecuencia de entrada de los productos a almacenar, según el criterio seleccionado.

Gestión de almacenaje

Este subsistema se encarga de que el producto permanezca en el almacén durante un tiempo previsto y en las condiciones deseadas. Sus elementos son:

- Tecnología de manipulación y almacenaje: De acuerdo con las características del producto y las exigencias del cliente, se definirán las condiciones de manipulación y almacenaje necesarias.
- Capacidad de almacenaje: De acuerdo con la tecnología de manipulación y almacenaje, así como las dimensiones de la instalación, se determinarán las capacidades de almacenaje existentes.
- Balance de almacenes: Con los resultados del subsistema de Gestión de inventarios (Cantidades a almacenar y Ciclo de reaprovisionamiento de los productos) se evaluará la posible existencia de conflictos con la Capacidad de almacenaje que se posee.
- Gestión de almacén: Este elemento abarca las actividades de recepción y posicionamiento del producto en el lugar adecuado, su custodia durante el tiempo que permanezca en el almacén y su manipulación hasta la salida, velando porque el mismo conserve sus propiedades y características originales.

Gestión de Pedidos

Este subsistema incluye los elementos siguientes:

- Envíos: Es el elemento encargado de conformar los envíos en el momento previsto, con las indicaciones necesarias y la documentación establecida.
- Captación Permite la captación de nuevos pedidos, así como la promoción. También incluirá la atención a reclamaciones.

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

Gestión de transporte

Este subsistema es uno de los más importantes, ya que es donde con más posibilidades, el producto puede ser dañado. Sus elementos son:

- Rutas de distribución.
- Necesidades de medios de transporte.
- Capacidad de transportación y balance de transporte.

En la estructura de las relaciones del canal logístico de distribución, los vínculos entre sus miembros se basan en 3 componentes básicos: las actividades, los recursos, y los participantes en el intercambio de forma tal que permitan que dicho intercambio pueda llevarse a cabo (Reyes Rojas, 2003).

Desde este punto de vista, puede afirmarse que dichas relaciones se caracterizan atendiendo al contenido económico y sociopolítico, dado por la interacción de dichos componentes: Los participantes, conjuntamente con los recursos y a través de diferentes actividades. (Kochenberger, 2003; citado en Meneses Marcel., 2009).

Tomando en cuenta las definiciones abordadas en la literatura consultada sobre las redes de distribución, se puede decir que las mismas son redes de transporte de mercancías y surgen por la necesidad de conectar y transportar los bienes de consumo desde su punto de producción (localización de la empresa) hasta el mercado (clientes).

El objetivo esencial de la distribución es garantizar el nivel de servicio deseado por los clientes, con un nivel de gastos que permita alcanzar las utilidades esperadas (Bowersox, 2001; citado en Meneses Marcel., 2009), de acuerdo con este autor, la distribución cumple diferentes funciones, entre ellas se pueden mencionar las siguientes:

- 1) Equilibrar la oferta y la demanda en cuanto a surtido, variedades y cantidades de productos e cada momento de acuerdo al comportamiento del mercado.
- 2) La información que posee el distribuidor permite establecer gustos, preferencias, fluctuaciones y tendencias, por lo que puede emitir opiniones sobre que surtidos producir, en que momento, en que cantidades, como promocionarlos.
- 3) La venta y la publicidad le otorgan una fortaleza muy particular al distribuidor, es la capacidad que dispone de publicitar, promocionar e influir en la venta del producto. El distribuidor puede manejar su propia imagen para influir en el consumidor hacia determinados productos.

El esquema de distribución que se adopte estará en correspondencia con la cantidad y ubicación geográfica de los puntos a suministrar, ya que por una parte la demanda generada por los clientes caracteriza los pedidos de los mismos en cuanto a tamaño, frecuencia, surtidos

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

y por otra parte la dispersión geográfica del segmento de mercado a servir determina la selección de los medios de transporte en cuanto a tipo y cantidades, incidiendo en los procesos de la gestión de distribución (Preparación del pedido y Transporte).

1.3.1 Rutas de distribución

De acuerdo con (Suárez Aguilera; Felipe Valdés y Pérez Cordero, 2002; citados en Fowler Casademont., 2010), la ruta es aquel camino o trayectoria a recorrer para ir de un lado a otro, recorriendo determinada distancia. En términos de rutas de distribución o reparto se puede decir que la ruta no es más que el camino habitual que permite trasladar los productos (mercancías) desde un origen ya sea una fábrica, un almacén central, una delegación, etc., hasta un cliente o destino que puede estar dado por una fábrica o taller, un almacén regulador, grandes superficies, o evidentemente el consumidor final.

Sin embargo cabe destacar que en presencia de una cantidad grande de alternativas a seleccionar en el diseño correcto de las rutas, su solución en general, resulta compleja y en muchos casos, la evaluación de cada una de las posibles combinaciones, constituye una tarea extremadamente costosa en tiempo.

A continuación se fundamentan algunos métodos y algoritmos para el análisis de las alternativas de solución que se pueden encontrar al analizar el problema de rutas.

1.4 Métodos y herramientas empleados en el problema de distribución

Para dar solución a la optimización de problemas de distribución, existen diversos métodos a aplicar, a continuación se explican una serie de métodos clasificados en tres tipos, los métodos exactos, los métodos aproximados y los heurísticos y por último una comparación de los mismos respecto a sus limitaciones, aplicaciones, ventajas y desventajas de los mismos.

1.4.1 Métodos exactos

Las técnicas exactas (enumerativas, exhaustivas, etc.) garantizan encontrar la solución óptima de cualquier problema. Serían los métodos idóneos si no tuvieran el inconveniente de la cantidad de tiempo necesario para la resolución. El tiempo crece exponencialmente con el tamaño del problema. En determinados casos, el tiempo de resolución podría llegar a ser de varios días, meses o incluso años, lo que provoca que el problema sea inabordable con estos métodos (Delgado Sobrino, 2009).

➤ Programación Lineal

De acuerdo con Delgado Sobrino (2009), la programación lineal también conocida como optimización lineal, es la maximización o minimización de una función lineal sobre un poliedro convexo definido por un conjunto de restricciones lineales no negativas. La teoría de la programación lineal cae dentro de la teoría de la optimización convexa y es también

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

considerada como parte importante de la Investigación de Operaciones, la cual constituye una herramienta de modelos cuantitativos para manejar diferentes tipos de problemas y ayudar a la toma de decisiones.

Algunas de las técnicas más usadas en el problema de distribución se pueden constatar en el **(Anexo 2)**.

La programación lineal entera (PLE) es el conjunto de problemas de programación lineal para los cuales todas o parte de sus variables pertenecen a los números enteros, (Lieberman y Hiller, 2007).

La metodología de la programación lineal se divide en dos pasos: primero modela o formula el problema, y posteriormente se resuelve el modelo de manera exacta.

En la modelización se tienen en cuenta:

- La variable de decisión, dada la problemática del problema
- La función objetivo que se determina por la combinación de variables de decisión en vistas de optimizar esta función objetivo, según un criterio de mínimo o máximo.
- Las restricciones del sistema, las cuales determinan el conjunto de valores posibles para las variables de decisión, también denominada como región factible. Las restricciones pueden ser tanto ecuaciones como inecuaciones, donde pueden ser de menor o igual, mayor o igual, o de igualdad.

La solución óptima del modelo se encuentra independientemente de esa región factible.

Tipos de modelos de Programación Entera

Los modelos de programación lineal entera pueden clasificarse en dos grupos:

- Puros. Siendo todas las variables de decisión enteras.
- Mixtos. Algunas de las variables son enteras y/o binarias, las otras no.

Las limitaciones de la programación lineal en su aplicabilidad están limitadas por diferentes suposiciones que se hacen, las cuales se exponen a continuación:

- Certidumbre: supone que toda la información implicada en el problema se conoce con certeza.
- Función objetivo lineal: suponiendo que la función es lineal, se asume que el costo unitario, precio o beneficio no le afectan los cambios en los de producción o las cantidades producidas o vendidas.

Según Moraga Suazo et al (2003) los algoritmos exactos son aquellos que producen una solución óptima y para ello emplean varias técnicas con el objetivo de reducir el espacio de búsqueda. Se emplean sólo en casos relativamente pequeños donde existan no convexidades, no linealidades, pocas restricciones y variables, debido a que el tiempo de computación

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

necesario para obtener la solución crece de forma desmesurada al aumentar el tamaño del problema.

A pesar de estas limitaciones poseen amplias aplicaciones en problemas de asignación de recursos, de balanceo de líneas, y otras. Estos métodos comprenden técnicas como las de programación lineal multicriterio, que contiene la programación de compromiso, programación meta y multimeta, lineal, entera y dinámica, el método de la matriz, el de Gaskell, el de Christofides y Ginozza, entre otros.

1.4.2 Métodos de prueba y error (aproximados)

Los algoritmos de aproximación son métodos para la resolución de problemas que hacen un primer intento y después utilizan los resultados obtenidos para hacer un segundo mejor intento. Este proceso se repite cuantas veces sea necesario para acercarse a la verdadera solución. Están siendo cada vez más utilizados para resolver problemas donde los algoritmos exactos de tiempo polinomial son conocidos pero muy costosos debido al tamaño de la entrada (Calvo Reyes, 2009).

Presentan limitaciones, tales como:

- 1) No todos son adecuados para todas las aplicaciones prácticas.
- 2) A menudo utilizan resolvidores de programación entera (IP), programación lineal (LP) y programación semidefinida, estructuras de datos complejas o técnicas de algoritmos sofisticadas que tienden a dificultar los problemas de implementación
- 3) Algunos poseen tiempos de ejecución poco prácticos, incluso a pesar de ser polinómicos.
- 4) La aproximación sólo es aplicable a los problemas de optimización, y no a los problemas de decisión en estado puro. Este método contiene las técnicas de Doll, el método de transporte, de producción de transporte, entre otros.

En ciencias de la computación e Investigación de Operaciones, un algoritmo de aproximación es un algoritmo usado para encontrar soluciones aproximadas a problemas de optimización, cuyos tiempos de ejecución están acotados por cuotas conocidas. Dentro de este método se encuentran técnicas tales como:

➤ **Algoritmo de Ford**

Este algoritmo está diseñado para determinar en un cierto gráfico o red, el camino más corto o más largo entre dos puntos elegidos, un origen y un final.

El procedimiento asocia a cada nodo, etiquetas P_i , que indican la distancia más corta hasta el origen, obtenida hasta el momento, y variables t_i , que indican el nodo que precede a i en el camino más corto obtenido (Soret los Santos, 2009; citado en Rodríguez Rodríguez, 2010).

Este algoritmo de Ford es más simple que el de Bellman Kalaban e intuitivamente más claro.

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

➤ **Método de Bellman-Kalaban**

El algoritmo de Bellman Kalaban resuelve exactamente el mismo problema que el anterior algoritmo de Ford. Su filosofía se basa en determinar la etiqueta de un nodo en una iteración a partir de las etiquetas de los nodos de los que proceden los arcos que llegan al nodo considerado (Soret los Santos, 2009; citado en Rodríguez Rodríguez, 2010).

➤ **Algoritmo de Floyd**

El algoritmo de Floyd intenta resolver el problema de encontrar el camino más corto entre todos los pares de nodos o vértices de un gráfico, y donde el número de iteraciones es igual al número (N) de nodos. Esto es similar a construir una tabla con todas las distancias mínimas entre pares de ciudades de un mapa, indicando la ruta a seguir para ir de la primera ciudad a la segunda (Soret los Santos, 2009; citado en Rodríguez Rodríguez, 2010).

Este algoritmo se puede resolver por programación dinámica, ya que es aplicable el principio de óptimo.

➤ **Algoritmo del barrido**

De acuerdo con Cespón Castro & Auxiliadora Amador (2003) este algoritmo pertenece al grupo de algoritmo de dos fases consistentes en agrupar primero y diseñar las rutas luego. La naturaleza de su procedimiento resulta muy práctica, dado que obedece al sentido lógico que requiere un análisis de rutas. Constituye quizás la herramienta que mayor empleo posee en la práctica, dado que el propio sentido común lleva a su concepción. Se recomienda en situaciones relativamente sencillas para el profesional encargado de trazar las rutas y en aquellos casos en que las distancias entre los puntos a recorrer son similares, tanto a la ida como al regreso, por lo que la mayor atención se dirige hacia la cantidad de materiales o productos que deben ser distribuidos y la capacidad estática de los medios de transporte seleccionados

Dada la manera en la que se forman las rutas; el proceso tiene dos etapas: primero, las paradas se asignan a los vehículos, y luego se determina la secuencia de las paradas dentro de las rutas. Dado este proceso de dos etapas, el tema de sincronización, como el tiempo total empleado en una ruta y el permiso de momento oportuno, no están bien manejados.

➤ **Algoritmo del agente viajero**

Es un método muy conocido y utilizado para definir rutas de distribución y a diferencia del método del barrido considera las distancias entre los diferentes puntos a distribuir, estableciendo secuencias de recorrido. Existe una gran cantidad de variantes de este procedimiento, muchas de las cuales pueden considerarse como métodos de optimización, aplicables fundamentalmente cuando no son muchos los puntos a distribuir.

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

Este tipo de problema se denomina Problema del Agente Viajero, porque refleja la tarea de un vendedor que necesita iniciar en su ciudad de residencia, visitar clientes en varias ciudades exactamente una vez y posteriormente regresar a su propia ciudad, minimizando el costo total del esfuerzo (Cespón Castro & Auxiliadora Amador, 2003).

1.4.3 Métodos heurísticos

Según el diccionario de la Real Academia Española en su edición del 2001, heurística, en algunas ciencias, es la manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos. Su funcionamiento se basa en la experiencia, en un conocimiento de experto, en una información externa al problema, es flexible, fácil de entender, puede ser fácilmente adaptada para incluir las restricciones encontradas en aplicaciones reales y realiza una exploración limitada del espacio de búsqueda. Los métodos heurísticos se emplean para resolver problemas no determinísticos polinomiales (NP). Dentro de sus principios se destacan la analogía y la reducción.

Según (Reeves, 1996; citado en Rodríguez Rodríguez, 2010), define el término heurística como un método que busca buenas soluciones cercanas al óptimo a un costo computacional razonable sin poder garantizar optimalidad.

Delgado Sobrino (2009) expresa que estos métodos presentan las siguientes ventajas:

- 1) No garantizan hallar la solución óptima a un problema, pero permiten, de una manera más eficiente desde el punto de vista computacional, aproximarse a tal solución.
- 2) Normalmente no se necesita una solución óptima, con frecuencia una buena aproximación es adecuada.
- 3) El intentar comprender por qué funciona una heurística sirve para comprender mejor el problema.

Su aplicación presenta inconvenientes como:

- 1) No considera la mejor ruta porque la solución que proporciona es algo probable y no cien por ciento segura.
- 2) Es difícil encontrar la heurística adecuada.
- 3) Existencia de óptimos locales que no sean absolutos.
- 4) Consiguen hacerse independientes de la solución inicial de la que se parta.

Son aplicables a cualquier ciencia y han adquirido mayor auge en la toma de decisiones, en el ajuste de redes neuronales, en el diseño automático de sistemas digitales, han sido aplicadas al paralelismo neuronal en computación y proporcionan técnicas para la solución del problema de ruteo de vehículos (González Vargas y González Aristizábal, 2007). Dentro de estos métodos se encuentran las técnicas de: ramificación y acotamiento, el vecino más cercano, el

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

método de los ahorros (Clarke & Wright), el método de Lemaire, de Ferguson, de Karg y Thompson, entre otros.

➤ **Método de Clark y Wright**

El objetivo del método de ahorros es minimizar la distancia total viajada por todos los vehículos y minimizar indirectamente el número de vehículos necesarios para atender todas las paradas satisfaciendo la demanda. Esta técnica consiste por sobre todo en conectar todos los clientes de pares con el almacén y calcular los ahorros obtenidos en costo de transporte, clasificar las alternativas de unión por ahorros decrecientes, adoptar la alternativa de unión de máximo ahorro y que a la vez consiste con el número de vehículos y sus capacidades, y proseguir iterando hasta que no exista mejora (González Oquendo & Bello Fernández, 2009).

1.4.4 Técnicas metaheurísticas

Las técnicas aproximadas sacrifican la garantía de encontrar el resultado óptimo a cambio de obtener una buena solución en un tiempo razonable. Se han venido desarrollando durante los últimos 30 años y se distinguen tres tipos: métodos constructivos, métodos de búsqueda local y las técnicas metaheurísticas (Calvo Reyes, 2009).

Los métodos constructivos suelen ser los más rápidos, parten de una solución vacía, a la que se les va añadiendo componentes, generan una solución completa.

Las soluciones ofrecidas suelen ser de muy baja calidad. Es muy difícil encontrar métodos de esta clase que produzcan buenas soluciones, y en algunas ocasiones es casi imposible, por ejemplo, en problemas con muchas restricciones.

Los métodos de búsqueda local usan el concepto de vecindario y se inician con una solución completa recorriendo parte del espacio de búsqueda hasta encontrar un óptimo local. Según Delgado Sobrino (2009), el vecindario de una solución es el conjunto de soluciones que se pueden construir a partir de aquella aplicando un operador de modificación denominado movimiento. Estos métodos parten de una solución inicial, examinan su vecindario y eligen el mejor vecino continuando el proceso hasta que encuentran un óptimo local. En función del operador de movimiento utilizado, el vecindario cambia y el modo de explorar el espacio de búsqueda también, pudiendo la búsqueda complicarse o simplificarse.

Según Glover y Laguna (1997) definen el término metaheurística como que guía y modifica otras heurísticas para producir soluciones más allá de aquellas que son normalmente generadas en una solicitud por optimalidad local, realizan así una exploración más profunda del espacio de búsqueda pero a expensas de un mayor tiempo de procesamiento. Las propiedades de las metaheurísticas radican en la simplicidad, precisión, coherencia,

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

efectividad, eficiencia, eficacia, adaptabilidad, robustez y autonomía. Se han aplicado en la ingeniería genética, en la toma de decisiones en tareas de planificación logística como rutas de distribución y recogida, carga y descarga, localización de puntos de servicio y diseño de redes.

Los autores citados anteriormente, consideran como técnicas metaheurísticas a los algoritmos de colonia de hormigas, recocido simulado, algoritmos genéticos, búsqueda tabú, redes neuronales, optimización por nubes de partículas, entre otros.

➤ **Metaheurísticas basadas en trayectoria**

Estas técnicas parten de un punto inicial y van actualizando la solución presente mediante la exploración del vecindario, formando una trayectoria. La búsqueda finaliza cuando se alcanza un número máximo de iteraciones, se encuentra una solución con una calidad aceptable, o se detecta un estancamiento del proceso (Calvo Reyes, 2009).

• **Búsqueda Tabú**

Es una de las metaheurísticas más utilizadas en problemas de optimización, se basa fundamentalmente en la utilización de un historial de búsqueda, que permite ejecutar su estrategia de análisis y exploración de diferentes regiones del espacio de búsqueda. Este historial o memoria se implementa como una lista tabú. En cada iteración se elige la mejor solución entre las permitidas y se añade a la lista tabú, donde se mantienen las soluciones recientes que se excluyen de las iteraciones siguientes (Delgado Sobrino, 2009).

• **Búsqueda en Vecindario Variable**

La Búsqueda por Entornos o Vecindarios Variables (Variable Neighborhood Search, VNS, en inglés), es una metaheurística reciente cuya idea original fue considerar distintas estructuras de vecindarios y cambiarlas sistemáticamente para escapar de los mínimos locales. El VNS básico obtiene una solución inicial, ejecuta una búsqueda local cuyo procedimiento consiste en reemplazar la solución actual si ha habido una mejora o modificar la estructura del vecindario en caso contrario. VNS se basa en tres hechos simples (Torres Cedeño, 2009).

- 1) Un óptimo local con respecto a una estructura de vecindad no necesariamente lo es con respecto a otra.
- 2) Un óptimo global es un óptimo local con respecto a todas las posibles estructuras de vecindad.
- 3) En muchos problemas, los óptimos locales con respecto a una o varias estructuras de vecindad están relativamente cerca.

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

➤ **Metaheurísticas basadas en la población**

Las técnicas metaheurísticas basadas en población trabajan con un conjunto de individuos que representan otras tantas soluciones. Su eficiencia y resultado depende fundamentalmente de la forma con la que se manipula la población en cada iteración. Seguidamente se describen algunas de las técnicas metaheurísticas basadas en población:

- **Algoritmo Genético (AG)**

Constituye una herramienta de resolución de problemas inspirada en la reproducción de los seres vivos; en la que las soluciones del problema son capaces de reproducirse entre sí, combinando sus características y generando nuevas soluciones. Los algoritmos genéticos son categorizados como heurísticas de búsqueda global, es decir, metaheurísticas avanzadas. Los algoritmos genéticos son una clase particular de los algoritmos de evolución que usan técnicas inspiradas en la biológica evolutiva, tales como herencia, mutación, selección y cruzamiento (también llamado recombinación) (Bello Fernández y González Oquendo, 2009).

- **Colonia de Hormigas**

El algoritmo de optimización por colonia de hormigas es una técnica probabilística para solucionar problemas computacionales que pueden reducirse a encontrar buenos caminos mediante gráficos, inspirado en el comportamiento de las hormigas en la búsqueda de alimentos; este algoritmo aplica integralmente conocimientos de la biología, las matemáticas y la inteligencia artificial. En otras palabras se resumiría destacando que la Optimización por Colonia de Hormigas (OCH) o Ant Colony Optimization (ACO) es una metaheurística que se inspira en el comportamiento que rige a las hormigas de diversas especies para encontrar los caminos más cortos entre las fuentes de comida y el hormiguero (Delgado Sobrino, 2009).

A continuación se brinda una serie de informaciones importantes que son de necesario conocimiento teniendo en cuenta los elementos fundamentales del problema de ruteo de vehículos (Calvo Reyes, 2009).

Vehículos:

- ✓ Cada vehículo debe tener límites (capacidad, peso, volumen o número de mercancías o personas) según el tipo de carga que lleve.
- ✓ En la mayoría de los casos cada vehículo tiene un determinado tiempo de funcionamiento ya que los choferes tienen un horario determinado.
- ✓ Cada vehículo tiene un costo asociado con su uso (entre otras cosas: combustible, gomas, reparaciones, etc.)

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

- ✓ Un vehículo puede satisfacer las demandas de varios clientes.

Clientes:

- ✓ Cada cliente tiene una demanda que debe ser satisfecha.
- ✓ Cada cliente tiene un determinado período de tiempo en el que puede recibir la mercancía.
- ✓ En algunos casos, si se especifica, los clientes pueden ser servidos por ciertas prioridades.
- ✓ Un cliente puede necesitar más de un vehículo para satisfacer su demanda.

El diseño correcto de las rutas tiene como tarea principal la reducción de los costos en que se pueden incurrir debido a distancias recorridas, gastos de combustible, uso innecesario de la técnica, etc.

Luego de fundamentado un conjunto de técnicas encontradas mediante la búsqueda en la literatura científica especializada, y que por su tipología se clasifican dentro del grupo de los métodos exactos, aproximados y heurísticos respectivamente, se procede a realizar una comparación entre estos métodos, ver **(Anexos 3 y 4)**.

Luego de conocer una amplia variedad de métodos y técnicas aplicables de acuerdo al entorno en que se desarrolle la investigación, se hace necesario tener en cuenta algunos de los pasos o etapas a seguir para aplicar un modelo matemático en general, por tal motivo el epígrafe siguiente aborda esta temática.

1.5 Etapas fundamentales de la modelación

La modelación se aplica en aquellas situaciones donde el estudio o análisis del objeto cognitivo es inviable, resulta muy costoso o demasiado riesgoso. El trabajar con el modelo del objeto cognitivo y no con su original ofrece la ventaja de que, en forma segura, rápida y sin grandes gastos económicos permite estudiar las propiedades del objeto cognitivo en cualquier situación imaginable. Un paso fundamental de la modelación consiste en la construcción o selección del objeto (tangible o abstracto) que reemplaza al objeto real en estudio, (Domínguez Calle, 2010).

La modelación relacionada con sistemas de representaciones integra: símbolos, signos, figuras, gráficas y construcciones geométricas. Éstos expresan el concepto y suscriben en sí mismos el modelo con el cual es posible interpretar y predecir comportamientos de fenómenos físicos. La simulación y la modelación son representaciones de un objeto matemático que está vinculado a una situación física o real. Una simulación es un intento por imitar o aproximarse a algo; por su parte, modelar significa construir una representación de algo. La diferencia semántica reside en que un modelo es una representación de estructuras, mientras que una

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

simulación infiere un proceso o interacción entre las estructuras del modelo para crear un patrón de comportamiento (Steed M, 1991; citado en Planchart Márquez, 2005).

Etapas de la modelación

De acuerdo con Lieberman y Hiller (2007), una manera de resumir las etapas usuales de un estudio de investigación de operaciones es la siguiente:

- 1) Definición del problema y recolección de datos
- 2) Formulación de un modelo matemático
- 3) Obtención de una solución a partir del modelo
- 4) Prueba del modelo
- 5) Preparación para la aplicación del modelo
- 6) Implantación**

Según Camarena (2001), la modelación matemática se concibe como el proceso cognitivo que se tiene que llevar a cabo para la construcción del modelo matemático de un problema u objeto del área del contexto. Según el propio autor este proceso consta de tres momentos que constituyen los indicadores de la modelación matemática:

- 1) Identificar variables y constantes del problema: Se identifica lo que varía y lo que permanece constante.
- 2) Establecer relaciones entre las variables y las constantes del problema.
- 3) Validar la relación matemática que modela al problema: se realiza a través de, regresar y verificar que la relación matemática involucre todos los datos del problema.

Según Ramos et al (2010), las etapas que componen un modelo son las siguientes:

- 1) Identificación del problema
- 2) Especificación matemática y formulación
- 3) Resolución
- 4) Verificación, validación y refinamiento
- 5) Interpretación y análisis de los resultados
- 6) Implantación, documentación y mantenimiento

De acuerdo con Domínguez Calle (2010), el proceso de modelación matemática de cualquier objeto cognitivo (proceso, fenómeno) consiste en un plan de trabajo preciso que se enmarca en tres etapas que conforman la trilogía modelo – algoritmo – programa como se muestra en la siguiente figura.

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

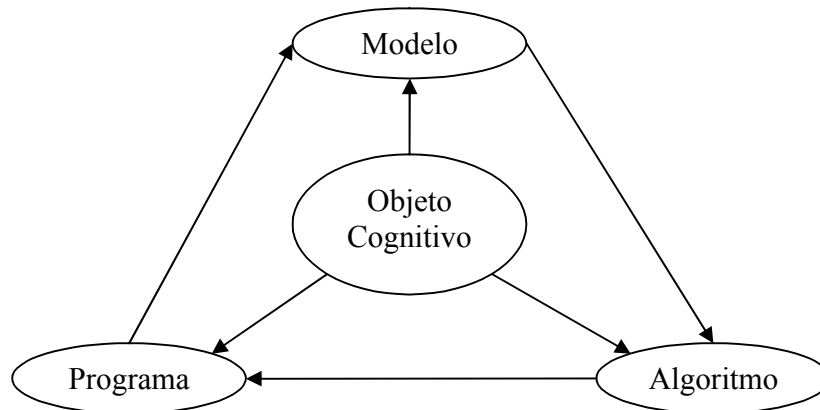


Figura 1.3: Trilogía Modelo – Algoritmo – Programa

Fuente: Domínguez Calle (2010)

Primera etapa

Se escoge o construye el equivalente al objeto cognitivo, el cual refleja en forma matemática sus propiedades más relevantes, los mecanismos a los que obedece su comportamiento y las conexiones entre sus partes y con su entorno. El modelo matemático es propuesto e investigado con métodos teóricos, lo que permite obtener información previa sobre el objeto cognitivo. Esta etapa requiere de un conocimiento amplio sobre el proceso en estudio y culmina con la formulación de las expresiones matemáticas que formalizan las concepciones cualitativas que se tiene del proceso.

Segunda etapa

Se escoge o desarrolla el algoritmo de cálculo que permite implementar el modelo en un ordenador. El modelo es llevado a una forma que permita la aplicación de métodos numéricos, se define la secuencia de las operaciones lógicas y aritméticas necesarias para encontrar, con la precisión requerida, las incógnitas que expresan las variables de estado del modelo. El algoritmo de calculo no debe distorsionar las cualidades básicas del modelo y en consecuencia del objeto cognitivo, también debe ser económico y adaptable a las particularidades de los problemas que se resuelven y al nivel tecnológico de los ordenadores disponibles.

Tercera etapa

Se crean los programas de ordenador que traducen el modelo y el algoritmo a un lenguaje entendible por el ordenador. A estos programas también se les exige ser económicos y adaptables, y son la versión digital equivalente al objeto cognitivo lista para la realización de experimentos numéricos en el ordenador.

Después de cumplir la trilogía modelo – algoritmo – programa se obtiene una herramienta universal, flexible y de bajo costo. Esta herramienta se depura y sintoniza con experimentos

Capítulo I: “Marco teórico referencial”

numéricos que permiten demostrar su adecuada correspondencia con el objeto cognitivo para posteriormente realizar los experimentos que arrojarán todas las características, cualitativas y cuantitativas, que se requiere conocer del proceso en estudio. Finalmente es necesario enunciar que el proceso de modelación se acompaña del perfeccionamiento paulatino de los tres eslabones de la triada.

1.6 Conclusiones parciales

La realización de este capítulo condujo a las siguientes conclusiones:

- 1) En la literatura científica especializada sobre Logística existe una amplia base conceptual sobre el tema de la logística que puede ser empleada como base de trabajo del presente trabajo de diploma. En ello particular interés presentan los diferentes conceptos y enfoques referidos a la logística de distribución, dado que lo que se pretende en la tesis es el mejoramiento de la red de distribución para la producción del azúcar refino en la provincia de Villa Clara.
- 2) En la literatura consultada se reflejan una serie de algoritmos y herramientas que contribuyen a dar solución al problema de distribución. Dicho instrumental tiene un carácter general, por lo que su aplicación al objeto de estudio práctico requiere de una necesaria adecuación y análisis. El mayor interés recae sobre los diferentes métodos aportados por diferentes autores, para la solución de los problemas que se presentan en las redes de distribución.
- 3) Con independencia del método o herramienta que se pretenda emplear para resolver problemas de distribución, los autores aportan diferentes metodologías o pasos de trabajo, que con las adecuaciones correspondientes pueden ser aplicados para la solución del problema científico planteado en la investigación.
- 4) El sistema logístico de distribución del Grupo Empresarial Agroindustrial (GEA) perteneciente al Ministerio del azúcar, requiere la aplicación de procedimientos científicos que tributen a la confirmación o mejoramiento de su desempeño, con vista a generar fortalezas que le permitan enfrentar los retos y amenazas que le impone el entorno, contribuyendo a responder los objetivos empresariales y hacia el logro de la excelencia.

Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

2.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo fundamental brindar toda la información posible de los pasos o etapas a través de los cuales se llevará a cabo el diseño del modelo matemático que permitirá la distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara desde sus centrales hasta cada una de sus refinerías. De acuerdo con lo anterior, la presente investigación se apoyará sobre los procedimientos expuestos en el capítulo anterior por los autores Ramos et al (2010) y Lieberman y Hiller (2007) los cuales están estrechamente relacionados y coinciden en varios de sus pasos o etapas para desarrollar un modelo matemático. No obstante, a continuación se exponen un conjunto de pasos a seguir (figura 2.1), los cuales si bien toman como base los autores antes citados, les han sido incluidas algunas variaciones por el autor de la presente tesis, para adaptarlo a las condiciones del problema a resolver.

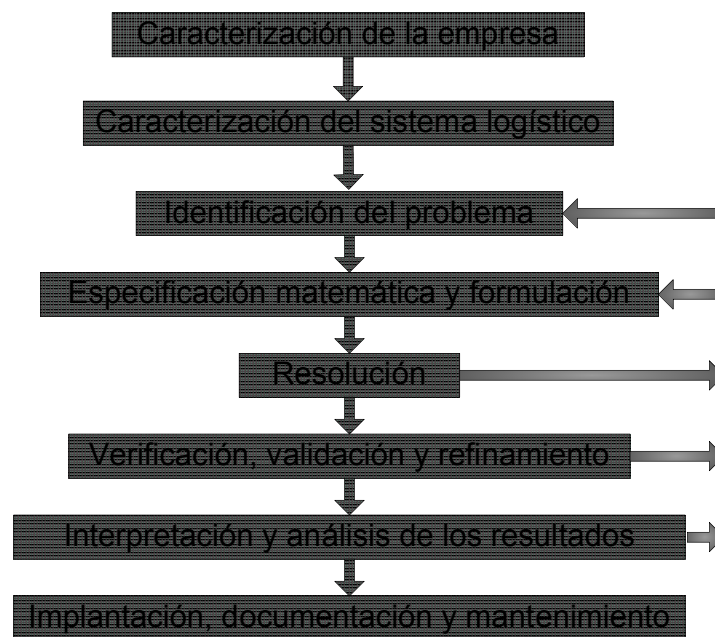


Figura 2.1: Procedimiento expuesto para el desarrollo del modelo matemático

Fuente: (Elaboración propia)

La explicación de los pasos o etapas del procedimiento a seguir para la modelación del problema se argumentarán en los siguientes epígrafes de este capítulo.

2.2 Caracterización del Grupo empresarial agroindustrial de Villa Clara

El Grupo Empresarial Agroindustrial de Villa Clara (GEA) se encuentra situado en el casco histórico de Santa Clara, el mismo lo conforman 11 empresas 10 azucareras 1 Servicios

Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

técnicos y 12 Entidades de Subordinación Nacional, identificadas en 4 Empresas, 7 Unidades Empresariales de Base y un Instituto.

El MINAZ tiene establecido el Sistema de Dirección por Procesos, mediante los cuales tienen salida los Principales Objetivos Estratégicos en correspondencia con la Misión de:

“Producir azúcar, alimentos y derivados a costos competitivos para satisfacer el consumo interno y las exportaciones, elevando la calidad de vida de la fuerza de trabajo y las comunidades que la integran”.

Objeto social

Dirigir, supervisar, controlar y evaluar los resultados técnicos, productivos económicos y financieros, de recursos humanos y comerciales así como la administración financiera de las entidades que se le integran.

Dichas entidades se dedican a la producción y comercialización de forma mayorista de azúcares y mieles, subproductos derivados tales como rones, alcoholes, ceniza, cachaza, bagazo, residuos agrícolas de la cosecha y otros provenientes de la agroindustria, energía eléctrica para el sistema nacional, semilla de caña certificada, así como equipos, partes y piezas de repuesto de la agroindustria. Se incluyen también servicios técnicos generales y producciones agropecuarias.

Participantes en la comercialización

Comercializadoras

Empresa Comercializadora de Azúcares y Productos del Ministerio del Azúcar, perteneciente al Grupo Empresarial Comercializador, Operador y Negociador de Azúcar y sus Derivados, en lo adelante CONAZUCAR, Empresa de Ingeniería y Servicios Técnicos Azucareros, en lo adelante TECNOAZUCAR, que comercializa de forma mayorista y minorista en divisas azúcares, alcoholes, rones y otros derivados de la agroindustria, así como los insumos, materias primas y materiales, el Grupo de Aseguramiento, en lo adelante AZUGRUP, para la comercialización de azúcar para insumos en centros de elaboración y otros de la diversificación.

Economía Interna

Se refiere a las Empresas Mayoristas de Alimentos, Empresas del Ministerio de Alimentación, de los Ministerios de las Fuerzas Armadas Revolucionarias, Ministerio del Interior, de la Agricultura, el Instituto Nacional de la Reserva Estatal (INRE), el Grupo Empresarial de Cuba Petróleo (CUPET) y Empresas o Granjas Agropecuarias del Ministerio del Azúcar, en lo adelante MINAZ u otras con centros de elaboración para el reforzamiento alimentario, que

Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

adquieren los azúcares ensacados, mieles, derivados y otras producciones, a través de la Empresa Comercializadora de Azúcares y Productos del Ministerio del Azúcar, por medio de sus Unidades Empresariales de Base.

Mercado Interno en Divisas

Comprende las empresas y entidades autorizadas a operar en divisas (Empresas Mixtas y Asociaciones Económicas Internacionales), o en ambas monedas (CUP y CUC), a las empresas estatales de capital 100% cubano, para la adquisición de las producciones del MINAZ destinadas a este mercado, a través de la Empresa TECNOAZUCAR.

Transportista

Empresas pertenecientes al Ministerio de Transporte (MITRANS) tal como la sucursal de la Unión de Camiones (UDECAM) en Villa Clara, TRANSMEC, FERROAZUCAR y cualquier otra entidad que se contrate para realizar la transportación.

Entidades prestadoras de servicios

Aquellas entidades que participan en la recepción, almacenaje y manipulación de las mieles, azúcares o alcoholes que ejecutan los mismos mediante contratos de servicios y cumplen todas las obligaciones pactadas a través del pago de la tarifa correspondiente, con arreglo de las disposiciones legales vigentes.

Como clientes se tienen a las comercializadoras

TECNOAZÚCAR

Comercializa las producciones de los centrales en el mercado interno de la provincia y en frontera tanto en moneda nacional como en divisas.

AZUGRUP

Comercializa las materias primas e insumos necesarios para todas las producciones que se realizan en las diferentes entidades de la agroindustria azucarera.

Como proveedores se tienen

Todas las empresas de producciones nacionales e internacionales que producen insumos para la agroindustria.

Mercado

En el mercado que se comercializan los productos es fundamentalmente el que se encuentran en frontera. En la diversidad de surtidos que producen las diferentes empresas del GEA, el azúcar refino a nivel nacional es un producto líder y en el caso del refino A, el cual se produce exclusivamente en la Empresa Azucarera George Washington, sus principales competidores

Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

son del mercado internacional, los cuales no interfieren directamente porque el país lleva a cabo una política de sustitución de importaciones, y cubre gran parte de la demanda.

2.3 Caracterización del sistema logístico de distribución de azúcar crudo en la provincia

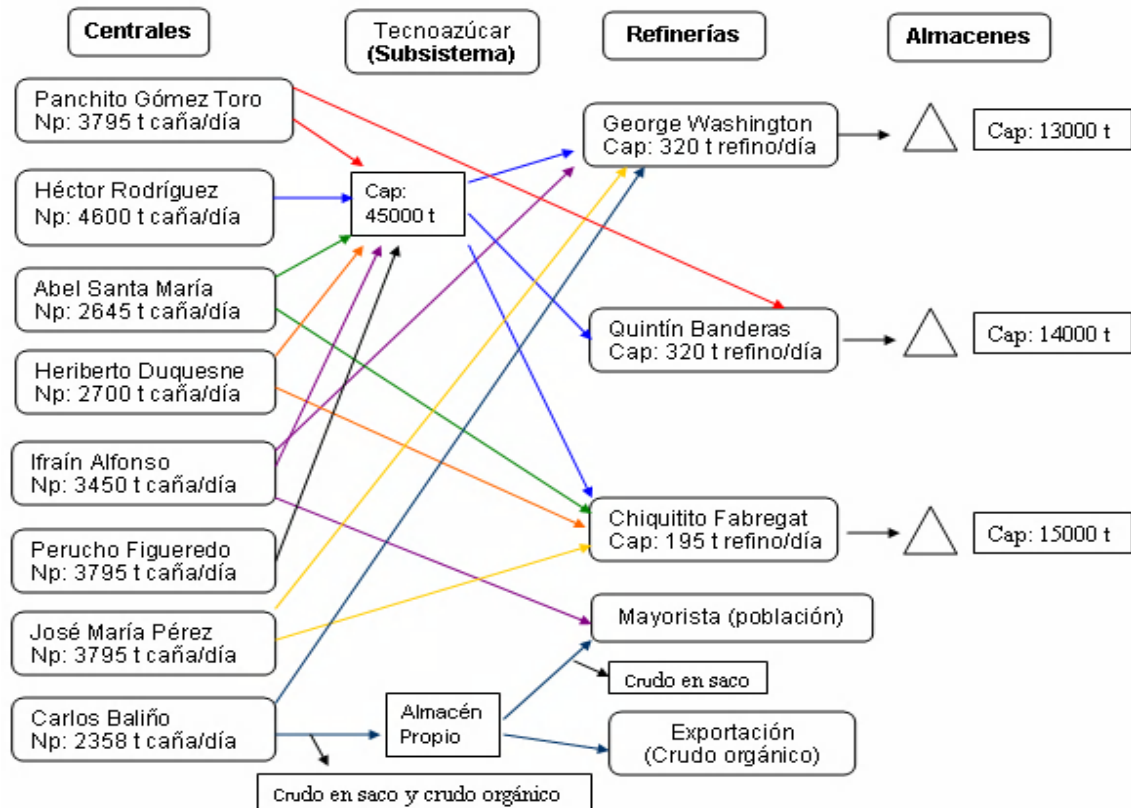
El sistema logístico por el cual se distribuye el azúcar crudo en la provincia de Villa Clara se caracteriza por poseer 11 fábricas de las cuales 3 son refinerías y las otras 8 son centrales. Cuenta también con tres grandes almacenes hacia donde se envía la azúcar ya refinada para su posterior uso.

La distribución desde los centrales hasta las refinerías se realiza por medio del grupo comercializador TECNOAZUCAR, y a través de la Unión de Camiones de Centro (UDECAM) perteneciente al territorio de Villa Clara, que no es más que una empresa transportista que posee varios equipos destinados a esta función y dentro de los cuales destacan los camiones Kamaz con capacidad de 20 toneladas y tecnología de la antigua URSS, también son empleadas para la distribución las tolvas ferroviarias, estas con capacidad de 50 toneladas. Esta función logística se realiza directamente desde cada central a su correspondiente destino por camiones, con la excepción del envío con destino a la refinería George Washington que se realiza por tolvas a través de la Unidad Empresarial de Base ferroviaria de Héctor Rodríguez, y de la fábrica Héctor Rodríguez que distribuye por medio de una banda transportadora toda su producción hacia su subsistema, el cual no es más que un gran almacén con capacidad de almacenaje equivalente a 45000 toneladas, ahora bien, en la realidad pueden existir cambios en el destino de las producciones de los centrales por inconvenientes en las refinerías para asumir sus envíos o roturas de las mismas, por tales motivos, el central Panchito Gómez Toro puede cambiar el destino de su producción hacia el subsistema Héctor Rodríguez en caso de que la refinería Quintín Banderas tuviese algún inconveniente para procesar su envío, por otro lado el central Abel Santa María puede enviar toda su producción hasta el subsistema Héctor Rodríguez si la refinería Chiquitico Fabregat no pudiera asumir su producción, el central Perucho Figueredo envía directamente al subsistema de Héctor Rodríguez y en el caso de los centrales José María Pérez y Carlos Baliño, el primero manda parte de su producción hacia la refinería Chiquitico Fabregat por camiones mientras que el resto es enviado en tolvas hacia la refinería George Washington, y el segundo (Carlos Baliño), posee características un tanto comunes, ya que cuando produce, una parte de su producción la envía en sacos hacia su propio almacén para luego ser trasladada hacia la mayorista la cual se encarga de distribuir el azúcar crudo hacia los diferentes centros para la población, mientras que la que saca a granel es enviada hacia Washington. Este último central, cuando produce crudo orgánico, lo envía

Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

hacia su almacén para luego exportarlo, también el central Ifraín Alfonso distribuye una parte de su producción hacia la refinería George Washington siempre y cuando la misma pueda asumir el envío, de lo contrario se ve forzado a tirar directamente al subsistema de Héctor Rodríguez, mientras que la otra parte de la producción se envía hacia la mayorista que como fue anteriormente explicado se encarga de distribuir azúcar a la población. A continuación, se muestra la red logística de distribución antes descrita, (figura 2.2).

Teniendo en cuenta la figura 2.2, el sistema logístico de distribución de azúcar crudo del MINAZ en la provincia de Villa Clara es bastante amplio, no obstante, este no fue el sistema logístico que formaría parte de la distribución de azúcar crudo en la provincia en la zafra 2011, debido a que para el cumplimiento del plan solamente se trabajaron con 8 de estas 11 fábricas, de las cuales, 5 fueron los centrales (Panchito Gómez Toro, Héctor Rodríguez, Abel Santa María, Heriberto Duquesne e Ifraín Alfonso) y las restantes 3 fueron las refinерías (George Washington, Chiquitico Fabregat y Quintín Banderas), realizándose la distribución de azúcar crudo desde los centrales hasta las refinерías y al subsistema a través de camiones Kamaz y solo en el caso del envío a Washington por ferrocarril. Seguidamente se muestra la red logística empleada para la distribución de azúcar crudo en la zafra 2011, (figura 2.3).



Capítulo II: "Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara"

Figura 2.2: Sistema logístico de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara

Fuente: (Elaboración propia a partir de documentos del Grupo Empresarial Agroindustrial)

Leyenda:

Norma potencial (Np): Es la cantidad de toneladas de caña que es capaz de procesar cualquiera de los centrales.

Capacidad (Cap): Cantidad de toneladas de azúcar refino capaz de obtener cada una de las refinерías a partir del azúcar crudo que le llega.

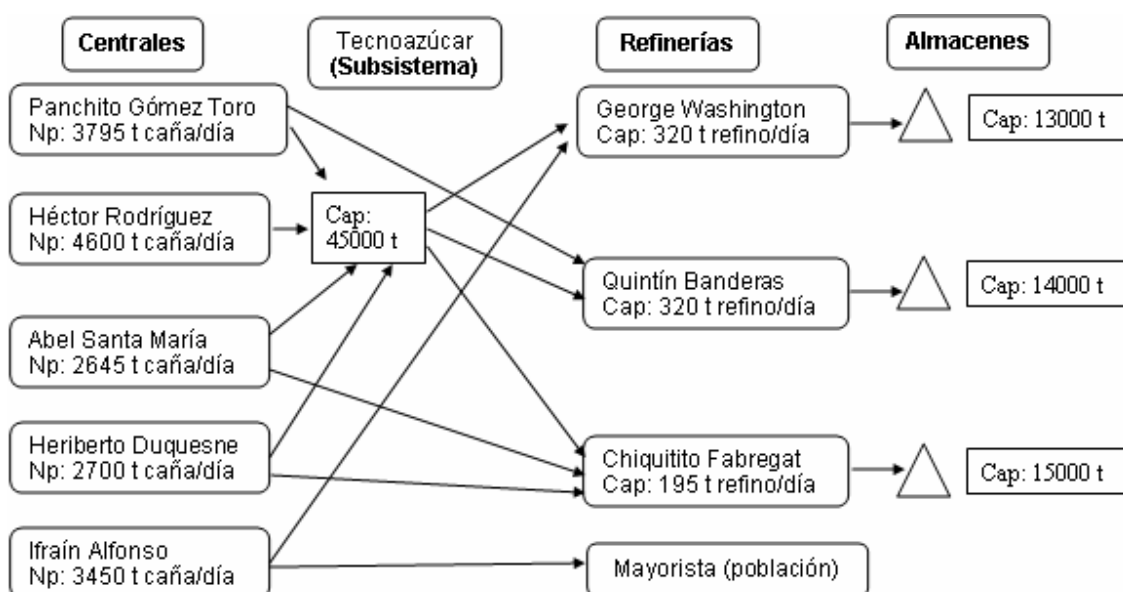


Figura 2.3: Sistema logístico usado para la distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara en la zafra 2011.

Fuente: (Elaboración propia a partir de documentos del Grupo Empresarial Agroindustrial)

2.4 Identificación del problema

De acuerdo con la importancia que posee este paso, la primera actividad que se debe realizar es el estudio del sistema relevante y el desarrollo de un resumen bien definido del problema a analizar. Ello consiste en la recolección y análisis de la información relevante en el intercambio de información entre el modelador y el experto, por lo que se deberá establecer una estrecha coordinación entre ambos. Esta etapa es fundamental para que tanto las soluciones proporcionadas como las conclusiones obtenidas sean útiles, y las decisiones adoptadas sean correctas.

Los datos serán de vital importancia para conseguir una solución lo más real posible ya que dicho proceso afectará en forma significativa la relevancia de las conclusiones del estudio. Es aquí donde se definen los objetivos a alcanzar, comúnmente en muchos equipos de trabajo el

Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

tiempo de recolección de datos puede ser extenso ya que representar la realidad conlleva un entendimiento exacto del problema y puede traer consigo que se necesite de un tiempo más prolongado y en ocasiones de la ayuda de otras personas, equipos u organizaciones.

2.4.1 Resumen del problema

Esta parte del proceso de identificación del problema radica en tener en cuenta las causas y efectos del problema en concreto, así como los objetivos y alcances que se desean satisfacer con la aplicación del modelo, y su posible solución.

2.4.2 Recolección y análisis de la información

Consiste en obtener toda la información posible a través de diferentes técnicas para comenzar a diseñar el modelo. Se deberán realizar entrevistas con el personal de la empresa especializado en las funciones del problema tratado y es importante que entre el modelador y el experto se lleve a cabo un proceso bastante serio en cuanto al intercambio de información, ya que es el punto de partida que se va a tener para empezar a expresar matemáticamente todo lo que transcurre en la práctica.

2.4.3 Selección de la técnica a utilizar en la investigación

Esta etapa constituye el primer paso para la solución del problema. Consiste en la búsqueda activa de ideas y sugerencias que guíen hacia la solución. Para el logro de posibles soluciones deben utilizarse métodos, metodologías y técnicas que requiere el problema en específico. Deberá hacerse un análisis profundo de cada una de las técnicas o métodos que se tengan como alternativas de solución al problema y se deberán comparar con el objetivo de valorar la mejor o la que más se adapta al entorno que se desea modelar.

2.5 Especificación matemática y formulación

Consiste en la escritura matemática del problema, definiendo todas sus variables, sus ecuaciones, función objetivo y sus parámetros. Los modelos o representaciones idealizadas son una parte de la vida cotidiana, y están expresados en términos de símbolos y expresiones matemáticas. El modelo matemático de un problema industrial es el sistema de ecuaciones y expresiones matemáticas que describen el problema, así se pueden tomar “n” decisiones relacionadas unas con otras y que se representan como variables de decisión, la medida de desempeño se expresa como función objetivo, y se expresan también matemáticamente todas las limitaciones o restricciones. Las constantes o coeficientes tanto en las restricciones como en la función objetivo se denominan parámetros.

➤ Las variables de decisión generalmente se denotan algebraicamente de la siguiente manera

(X_1, X_2, \dots, X_n) , y para las cuales siempre se deben buscar sus valores respectivos, las

Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

mismas son fundamentales en el problema, pues de no ser la correcta el problema nunca brindará la solución adecuada ni representará fielmente la realidad que se desea modelar.

- La función objetivo, es un paso crucial en la formulación de un modelo, expresa la medida de desempeño que se desea obtener (por ejemplo maximizar la ganancia o minimizar los costos) su expresión matemática es la siguiente: $\text{Max/Min } (Z) = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n$
- Las limitaciones o restricciones también se pueden representar matemáticamente, y cada una ellas representan el conjunto de relaciones (expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones) que ciertas variables están obligadas a satisfacer. Por ejemplo, para el caso de la capacidad de producción de cierta fábrica. En la tabla 2.1 se muestra la forma general en la que se expresan las restricciones.
- Los parámetros del modelo, no son más que los coeficientes que se encuentran en el lado derecho de las restricciones o en la función objetivo.
- La condición de no negatividad es sumamente importante ya que permite que las variables no tomen valores negativos.

Tabla 2.1: Forma general de las restricciones

| | | |
|---|--------|-------|
| $A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + \dots + A_{1n}X_n$ | \leq | b_1 |
| $A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + \dots + A_{2n}X_n$ | \leq | b_2 |
| hasta | | |
| $A_{m1}X_1 + A_{m2}X_2 + \dots + A_{mn}X_n$ | \leq | b_m |

Fuente: (Elaboración propia)

Los (A_{ij}) generalmente expresan la cantidad de recursos que se necesitan para cada actividad (X_{ij}) , los (b_i) brindan la información de la disponibilidad de recursos que se posee para cada limitación y los (C_j) proporcionan la información acerca del nivel de efectividad de lo que se desea (por ejemplo lo que cuesta producir un producto cualquiera o lo que se obtiene por cada producto vendido).

Los modelos matemáticos tienen varias ventajas, una ventaja obvia es que el modelo matemático describe un problema de forma más concisa y esto tiende a hacer que toda la estructura del problema sea más comprensible y ayude a revelar las relaciones importantes entre causa y efecto. De esta manera indica con más claridad los datos adicionales más importantes para el análisis, facilita el manejo del problema en su totalidad y forma un nexo directo con la aplicación de diferentes software en computadoras.

Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

La especificación matemática es fundamental en cualquier problema de optimización pues constituye la representación matemática de la realidad que se desea estudiar, al desarrollar el modelo es bueno siempre empezar con una versión sencilla que permita evolucionar hasta un modelo más complejo que refleje mejor la complejidad del problema real.

2.6 Resolución

Se trata de implantar un algoritmo de obtención de la solución numérica (muy próxima a la matemática) óptima o subóptimas. El algoritmo puede ser de propósito general (método simplex) o específico. La solución óptima debe ser satisfactoria y servir como guía al experto. Generalmente se piensa en la obtención de una solución óptima, es decir, la mejor, pero ciertamente no existe una garantía absoluta de que la solución óptima es la mejor solución que resulte ser aplicable en la práctica al problema real, puesto que el modelo es una idealización y no una representación del problema real. En ocasiones los equipos de investigación utilizan procedimientos heurísticos que aunque no garantizan una solución óptima, proporcionan una buena solución subóptima a partir de un diseño intuitivo.

Con el objetivo de dar respuesta a los problemas de optimización se pueden usar software como el WINQSB para obtener la solución, o aplicar también el método de las tablas Simplex, en el cual se transforman las inecuaciones en ecuaciones y para ello se le añaden variables de holgura, partiendo de una versión inicial como se muestra en la tabla 2.2.

En esta tabla, las VB son variables básicas y solo pueden encontrarse en una restricción y tener coeficiente 1, los valores de (A_{ij}) son los coeficientes de cada una de esas variables básicas en las restricciones o en la función objetivo. En este método de solución existen criterios de entrada y salida de cada variable desde o hacia la base partiendo del tipo de optimización que se busque (Maximizar o Minimizar) y se termina cuando se encuentra en la tabla todos los valores positivos para problemas de máximo, o todos los valores negativos para los de mínimo.

Tabla 2.2: Modelo general de las tablas simplex

| | | | | | | |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| VB | Z | X_1 | X_2 | X_3 | X_n | b_i |
| Z | A_{11} | A_{12} | A_{13} | A_{14} | A_{1n} | b_1 |
| X_3 | A_{21} | A_{22} | A_{23} | A_{24} | A_{2n} | b_2 |
| X_m | A_{m1} | A_{m2} | A_{m3} | A_{m4} | A_{mn} | b_m |

Fuente: (Elaboración propia)

Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

Existen también muchos otros métodos de solución para los problemas de optimización tales como (Método gráfico, Método algebraico, tablas Simplex, Método de la Gran M, Método Simplex – Revisado y Método de las dos fases). Ahora bien, para llevar a cabo la corrida del diseño se necesitan tener establecidas y muy bien definidos todos los parámetros anteriormente enunciados para luego ir desarrollando el modelo a partir de las soluciones que el mismo brinde inicialmente, ya que desde un inicio no se encuentra la mejor solución puesto que siempre surgen nuevas modificaciones que se traducen en tener que reestructurar el modelo para poder modelizar lo mejor posible la realidad.

2.7 Verificación, validación y refinamiento

Esta etapa conlleva la prueba exhaustiva del modelo o programa con vistas a encontrar los posibles errores de codificación y corregirlos, es necesario comprobar entonces la validez de las simplificaciones a través de los resultados que se obtengan y puede dar lugar a nuevas necesidades de refinamiento en el modelado para mejorar la capacidad de representación del sistema, eliminando la linealidad y hacer el modelo no lineal o hacer el modelo estocástico si la realidad lo exige.

Eventualmente, después de una larga serie de cambios en el modelo se concluye con una versión que proporcione resultados razonablemente válidos. Sin duda alguna es posible que queden algunas fallas ocultas que deberán ser eliminadas y para hacerlo es necesario ver el modelo de manera global y eliminar omisiones que pueden ser obvias. Se recomienda para que el resultado de esta prueba y búsqueda de fallas sea lo mejor posible, el equipo a cargo deberá incluir al menos una persona que no haya participado en la formulación del modelo, también es recomendable analizar todas las formulaciones hechas en el problema y asegurar que sean consistentes en las dimensiones de las unidades que se emplean.

Otro enfoque para la prueba y validación del modelo, es emplear una prueba retrospectiva, o sea utilizando datos históricos se determina si el modelo y la solución hubiesen tenido un buen desempeño, la comparación de la efectividad de este desempeño con lo que en realidad ocurrió, indica si el uso del modelo tiende a dar mejoras significativas sobre la práctica actual.

2.8 Interpretación y análisis de los resultados

Esta etapa consiste en proponer soluciones y conocer en detalle el comportamiento del modelo, al hacer un análisis de sensibilidad en los parámetros de entrada, estudiar diferentes escenarios de los parámetros y detectar soluciones alternativas cuasióptimas pero que sean suficientemente atractivas. Es aquí en donde se empiezan a ver cuan real fue lo que se modeló matemáticamente partiendo de la información que brindan los resultados alcanzados.

Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

Los escenarios posibles son capaces de satisfacer otros requerimientos o inquietudes que se puedan tener, con vistas a prevenir cualquier variación en el problema real y a partir de ello saber entonces como actuar para darle solución al cambio ya esperado.

2.9 Implantación, documentación y mantenimiento

Esta es una etapa fundamental del desarrollo de un modelo para garantizar su amplia difusión, la documentación ha de ser clara, precisa y completa de forma que garantice que sea de entendimiento para los que van a ser uso del modelo y comprender como fue que se preparó todo el diseño, por lo que el manual de usuario debe incluir la especificación técnica funcional, matemática e informática. Por otra parte el propio código debe incluir una buena documentación con el objetivo de facilitar la tarea de mantenimiento.

En este paso de puesta en práctica, tiene gran peso el apoyo que sea capaz de brindar la administración y la gerencia operativa, para lo cual es importante todo el proceso informativo por parte del modelador a la gerencia durante el desarrollo del estudio. La buena información ayuda a que el estudio satisfaga lo que la administración quiere y brinde sentimiento de que el estudio también es de ellos. Esta etapa requiere de una cuidadosa explicación a la gerencia operativa sobre el nuevo sistema que se va a adoptar y su vínculo con la realidad, para ello ambos grupos comparten responsabilidades en cuanto a la puesta en práctica del sistema, posteriormente la gerencia deberá dar una capacitación al personal que interviene directamente.

En esta investigación se brindará de forma explícita toda la documentación del estudio y se hará participe al personal de la empresa con vistas a que una vez concluido el estudio, la entidad cuente con toda la información necesaria acerca del modelo. También se explicará de forma detallada todo lo relacionado con el diseño del modelo, así como se brindarán consejos y posibles soluciones ante cambios del entorno práctico que posibiliten a la institución actuar de forma eficaz.

2.10 Conclusiones parciales

La realización de este capítulo condujo a las siguientes conclusiones:

- 1) El procedimiento tomado como base para la realización del estudio, tiene como antecedentes los criterios reflejados en la literatura científica y los aportados por el autor de la presente tesis. En particular, entre los aportes esenciales están sus dos primeros pasos de trabajo, dedicados a la caracterización de la entidad y del sistema logístico a estudiar que aunque forman parte de la Identificación del problema, posibilitan una mejor comprensión del mismo, por parte de las personas encargadas en un futuro de su empleo.

Capítulo II: “Etapas para el desarrollo del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

- 2) De la caracterización de la empresa objeto de estudio y de su sistema logístico se evidencia, que se está en presencia de una red logística ya existente, con almacenes, fábricas de azúcar, medios de transporte, vías de comunicación, etc. No se trata entonces de diseñar una nueva red logística, sino de estudiar la existente con la ayuda imprescindible de los expertos de la empresa analizada y de ello derivar si la forma de trabajar es susceptible de mejoras o si el estudio realizado sirve de validación al trabajo que desempeñan.
- 3) El procedimiento general, mostrado en la figura 2.1, incluye retroalimentaciones que son parte del propio refinamiento de la modelación y de las decisiones que se van obteniendo. La naturaleza de estas retroalimentaciones son explicadas en los restantes pasos de trabajo contenidos en el capítulo.
- 4) Los procedimientos, métodos y herramientas, recomendados en los diferentes pasos del procedimiento general (figura 2.1), se corresponden con las particularidades del Grupo Empresarial Agroindustrial (GEA) perteneciente al Ministerio del azúcar la empresa estudiada y el sistema logístico para la producción y distribución del azúcar refino en la provincia de Villa Clara, que constituyen sus dos primeras etapas o pasos de trabajo, lo cual debe facilitar la aplicación general que se presenta en el próximo capítulo.

Capítulo III: “Desarrollo y aplicación del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”

3.1 Introducción

Considerando el problema científico que originó la presente investigación, caracterizado y fundamentado en la introducción de este Trabajo de Diploma, se proyecta como objetivo fundamental de este capítulo, validar la hipótesis de la investigación. Para ello, se procede a la aplicación parcial del procedimiento a seguir para elaborar un modelo matemático, el cual fue analizado en el capítulo 2, desarrollando cada etapa y pasos que lo componen y realizando en cada uno de los casos los análisis y ajustes pertinentes al objeto de estudio con apoyo del personal de trabajo especializado.

3.2 Descripción del problema

Teniendo en cuenta las características de la red logística para distribuir azúcar crudo, expuesta en el capítulo 2 de esta tesis, se tomarán las decisiones convenientes en este caso para determinar los centros de obtención de azúcar de la provincia que serán participes de la molienda y en consecuencia cuales serán sus planes de producción a alcanzar, quedando de esta manera definida la red logística para la obtención de azúcar refino.

3.2.1 Resumen del problema

La distribución de azúcar crudo hacia las refinerías para obtener azúcar refino, se realiza en el objeto de estudio práctico, sobre la base de la experiencia del personal que en ello labora. Se precisa entonces de modelar el problema bajo otras vías, con el objetivo de validar o mejorar el mencionado proceso de distribución, siempre bajo la óptica de un enfoque logístico.

3.2.2 Obtención de la información

La información necesaria para la investigación y desarrollo del modelo se obtuvo a partir de consultas a documentos de la empresa relacionados con las actividades de obtención y distribución de azúcar y de entrevistas con el personal directivo especializado en las funciones a las cuales se hizo necesario acudir con vistas al logro de los objetivos de la investigación.

3.2.3 Selección de la técnica a utilizar en la investigación.

Partiendo de un profundo análisis de las técnicas representadas en el Anexo 4 de la presente investigación y por las características que se desean modelar del sistema logístico de distribución de azúcar en la provincia, referidas a combinar la necesidad de cumplir con los planes de entrega y las disponibilidades de cada uno de los centros, se selecciona la programación lineal como método de solución al problema real, haciendo uso del software WINQSB disponible en el territorio.

3.3 Construcción del modelo matemático

En el sistema logístico de distribución de azúcar crudo desde cada uno de los centrales hasta las refinerías, se debe tener en cuenta que no todas las fábricas de crudo distribuyen hasta cada una de las refinerías ya que es posible que entre varias de ellas no existan vías para el traslado del producto o el mismo se haga muy costoso y sea más factible enviarlo hasta aquellas refinerías más cercanas, de acuerdo con lo anteriormente dicho, a continuación a partir de una serie de pasos se muestra como es que se realiza la selección por parte del Grupo Empresarial Agroindustrial de los centrales y las refinerías que participan en las zafras y cuales son los criterios que se siguen para establecer la red logística así como el desglose de los planes de azúcar crudo y refino por centrales y centros de refinamiento para confeccionar el modelo de manera que el mismo se ajuste a la realidad.

Paso 1

Lo primero que se hace es determinar el plan de producción de crudo de la provincia. Ello consiste en que una vez determinadas las cantidades de toneladas de caña que se tienen en los campos para la molienda, y su rendimiento promedio por central, (en % de toneladas de azúcar crudo por cada tonelada de caña), se estima entonces el total de toneladas de crudo que se puede hacer en cada uno de los centros. Para saber la cantidad de toneladas de caña disponibles para moler, en cada área de siembra de cada central se conoce las arrobas sembradas en cada territorio y ese valor multiplicado por 0.0115 toneladas por arroba de caña proporciona el total de toneladas de caña de que dispone cada central para moler. Estos datos ya fueron convertidos y se muestran en la tabla 3.1. Para saber el rendimiento con que comienza cada central se reúnen los datos de rendimiento de la caña de los últimos 5 años, se desecha el mayor y el menor y se promedia el resto, de esta manera se conforma el plan de crudo para cada central.

Tabla 3.1: Plan de toneladas de caña a moler por central en la zafra 2011

| Centrales | Toneladas de caña | Rendimiento de la caña (%) |
|---------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Panchito Gómez Toro | 288435.18 | 10.8 |
| Héctor Rodríguez | 317193.48 | 10.44 |
| Abel Santa María | 184576.96 | 10.16 |
| Heriberto Duquesne | 132222.7 | 10 |
| Ifraín Alfonso | 283443.47 | 11.5 |

Fuente: (Tomado del plan de zafra 2010-2011)

Para decidir los centrales que participan en cada zafra se tienen en cuenta los siguientes aspectos o criterios.

- Rentabilidad de cada central
- Alistamiento de cada central: Es decir si posee condiciones de funcionamiento.

Capítulo III: “Desarrollo y aplicación del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”



- Ubicación geográfica

La rentabilidad de cada central es expresada de acuerdo al volumen de caña que el mismo pueda moler, y teniendo en cuenta que según los especialistas en la materia para que un central sea rentable debe poseer materia prima (caña) para funcionar entre 65 y 80 días, o más.

En la zafra del 2011 tres centrales que componen la red logística general de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara (José María Pérez, Carlos Baliño, Perucho Figueredo), no molieron por carecer de suficiente volumen de caña para ser rentables. Así, la caña perteneciente a Carlos Baliño fue utilizada por Ifraín Alfonso, la de Perucho Figueredo fue molida por los centrales Abel Santa María y Héctor Rodríguez, y la de José María Pérez por Abel Santa María y Heriberto Duquesne.

Teniendo en cuenta el contenido de la (tabla 3.1), y aplicando la expresión 3.1 se obtienen en los días totales planificados a moler por cada central, ver (tabla 3.2).

$$\frac{\text{Total de caña a moler}}{\text{Norma potencial de cada central}} = \text{Días totales planificados}$$

Tabla 3.2: Plan de toneladas de caña a moler por central en la zafra 2011

| Centrales | Toneladas de caña | Norma Potencial (toneladas de caña por día) | Días de zafra |
|---------------------|-------------------|---|---------------|
| Panchito Gómez Toro | 288435.18 | 3795 | 76 |
| Héctor Rodríguez | 317193.48 | 4600 | 69 |
| Abel Santa María | 184576.96 | 2645 | 70 |
| Heriberto Duquesne | 132222.7 | 2700 | 49 |
| Ifraín Alfonso | 283443.47 | 3450 | 82 |

Fuente: (Tomado del plan de zafra 2010-2011)

Es necesario aclarar que los días de zafra planificados generalmente son inferiores a los reales en tiempo de zafra puesto que no siempre los centrales muelen todos los días, ya que en ocasiones sufren roturas, en cuyo caso existen centrales que toman la caña de otros como fue descrito anteriormente. El central Heriberto Duquesne posee una característica que justifica su arrancada durante pocos días y eso radica en que parte de su total de caña no se procesa para crudo sino para alcohol.

Paso 2

Anualmente las tres refinerías participan en toda la zafra, ya que es una política del país sustituir importaciones mediante producciones nacionales, y si en algún momento se tuviese que importar refino se incurriría en enormes costos dadas las circunstancias del mercado mundial. A ello se añade que del total de azúcar refino que se consume en el país, casi un 50% es producido en el territorio de Villa Clara.

Capítulo III: “Desarrollo y aplicación del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”



El establecimiento del plan de refino es desglosado a partir de un balance nacional, donde se consideran las posibilidades de la provincia. En el caso del refino producido en la refinería George Washington, por sus características especiales se trata de respetar las cantidades establecidas. Hoy en día todo el crudo que se produce se envía para refinar, solo con la excepción del que va destinado a la población y si falta para completar el plan se procesa crudo de las provincias aledañas.

Paso 3

Una vez definidos los centrales y refinerías que participan en la molienda, lo siguiente es determinar los canales de distribución y los medios de transporte para realizar dicho proceso. En la presente zafra 2011, luego de aplicar los pasos de trabajo anteriores se obtiene que la red logística de distribución la componen 8 fábricas, de las cuales 5 son centrales y 3 son refinerías. Desde los centrales hasta las refinerías la distribución se realiza por medio de la comercializadora TECNOAZUCAR, la cual a través de las empresa transportistas Unión de Camiones de Centro (UDECAM) y la Unidad Empresarial de Base ferroviaria de Héctor Rodríguez, ambas pertenecientes al territorio de Villa Clara, se envía el crudo desde cada central hasta su correspondiente destino. Para establecer los destinos del azúcar crudo que produce cada central, TECNOAZUCAR se basa en los siguientes aspectos.

- Potencial de las empresas que producen y reciben.
- Distancia entre las empresas productoras y tributarias.

El primero se refiere a establecer un análisis de capacidad entre las empresas para determinar cuales serán las posibles cantidades que se enviarán y las que se recepcionarán, y el segundo, con el objetivo de disminuir los costos de distribución de azúcar crudo. Después de estas consideraciones y a los efectos de esta investigación la red logística de la zafra 2010-2011 se muestra en la figura 3.1.

Luego de conformada la red logística para distribuir azúcar crudo se procede al cálculo del costo total de distribución de crudo con el objetivo de conocer su magnitud. Actualmente este paso de trabajo se realiza en base a la experiencia, por lo que el resultado de la tabla 3.3 contiene el real de la zafra estudiada. Sin embargo, es aquí donde puede ser empleada la programación lineal y construir el modelo que permita validar o mejorar la forma tradicional de trabajo de la empresa. La tabla 3.3 se corresponde con la red logística de la figura 3.1 y como puede observarse contiene las tarifas y las cantidades reales que fueron enviadas desde cada uno de los centrales hasta su correspondiente destino.

De acuerdo con la tabla 3.3 es necesario decir que para obtener el costo total aproximado de distribución, se consideran las tarifas establecidas en la Resolución P-217 del 2004 por el

Capítulo III: “Desarrollo y aplicación del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”



Ministerio de Finanzas y Precios de la república de Cuba para la transportación de azúcar y las variaciones reales a la que están sujetas estas tarifas, producto de la demora de las cargas o el recorrido vacío de los medios, para lo cual se decidió trabajar en la presente investigación con las tarifas reales utilizadas por la empresa transportista (UDECAM). Por otro lado, el central Ifraín Alfonso distribuyó el resto de su producción (14586 toneladas) a la empresa mayorista encargada de distribuir azúcar crudo para consumo de la población en base a lo planificado en el plan de zafra. Por tal motivo no se tuvieron en cuenta los envíos ni las tarifas hacia esos lugares pues no se relacionan con la problemática de la investigación que está dirigida al azúcar refino. Como se puede apreciar en la tabla, el costo total de distribución de azúcar crudo desde los centrales hasta las refinerías es de \$ 638993.926.

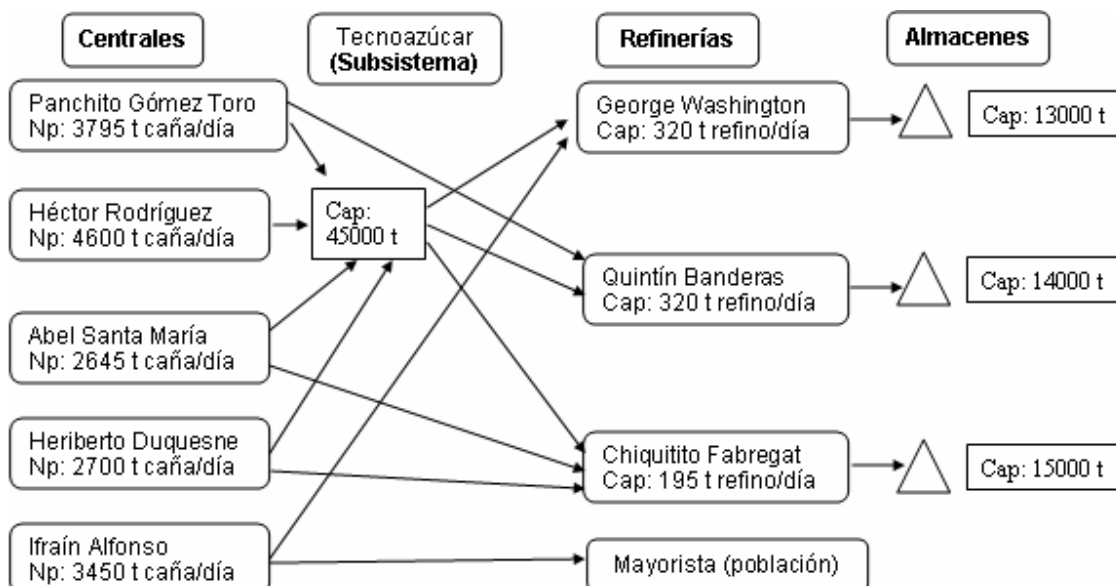


Figura 3.1: Red logística de la zafra 2010-2011

Fuente: (Elaboración propia a partir de documentos del Grupo Empresarial Agroindustrial)

Tabla 3.3: Cantidades distribuidas en la zafra 2010-2011 hasta el 24 de Mayo de 2011

| Origen | Destino | Toneladas distribuidas | Real producido | Tarifa (\$/t) | Importe (\$) |
|---------------------|---------------------|------------------------|----------------|---------------|--------------|
| Panchito Gómez Toro | Quintín Banderas | 32112 | 33176.2 | 7.03 | 225747.36 |
| | Subsistema | 1064.2 | | 3.32 | 3533.144 |
| Abel Santa María | Chiquitico Fabregat | 1251 | 21359 | 5.34 | 6680.34 |
| | Subsistema | 20108 | | 3.32 | 66758.56 |
| Heriberto Duquesne | Chiquitico Fabregat | 13421 | 14259 | 3.97 | 53281.37 |
| | Subsistema | 838 | | 7.95 | 6662.10 |
| Ifraín Alfonso | George Washington | 18308 | 32894 | 5.18 | 94835.44 |
| Héctor Rodríguez | Subsistema | 33552 | 33552 | 0.81 | 27177.12 |
| | Quintín Banderas | 22439.12 | | 3.97 | 89083.306 |
| Subsistema | Chiquitico Fabregat | 2551.68 | | 8.28 | 21127.91 |
| | George Washington | 7463.16 | | 5.91 | 44107.275 |

Capítulo III: “Desarrollo y aplicación del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”



| | | | |
|-------|----------|----------|-------------------|
| Total | 120654.2 | 135240.2 | 638993.926 |
|-------|----------|----------|-------------------|

Fuente: (Elaboración propia a partir de datos de la empresa TECNOAZUCAR)

Teniendo en cuenta todas las limitaciones reales y toda la información que anteriormente fue expuesta acerca del trabajo por parte de las empresas encargadas de producir azúcar crudo y comercializarla y con la meta de disminuir los costos de distribución el modelo matemático fue construido siguiendo los pasos del procedimiento establecido para ello en el capítulo anterior: Este modelo se basa en la programación lineal, y para su diseño se tiene en cuenta la información de la tabla 3.4. También es necesario aclarar que el modelo se puede construir con los datos planificados para la zafra pero a los efectos de esta investigación de comprobar de forma científica si se puede reducir el costo total de distribución, se construye el mismo a partir de los datos reales de distribución mostrados en la (tabla 3.3). Por tal motivo se establecen las variables de decisión y posteriormente se define una función objetivo que minimiza el costo asociado a la transportación, además de un conjunto de restricciones que permiten reflejar matemáticamente la realidad, y por último la condición de no negatividad del modelo.

Variables de decisión:

(X_{ij}) : Cantidad real de azúcar crudo en toneladas transportadas desde el origen i hasta el destino j , donde $i=1, \dots, 5$; $j=1, \dots, 4$.

(C_{ij}) : Tarifa de transportación en pesos por toneladas desde el origen i hasta el destino j .

Función objetivo: $Min(Z) = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 (C_{ij} * X_{ij})$, luego se definen los componentes de la red

logística como se muestra en la siguiente tabla, ya que de esta forma se da un primer paso antes de establecer las restricciones que debe cumplir el modelo. Además de estas consideraciones y datos de relevada importancia, el conjunto de ecuaciones desarrolladas para la construcción del modelo se muestran en la (tabla 3.7).

Tabla 3.4: Componentes de la red logística

| Subíndice | Significado | Valores | |
|-----------|--|---------|--------------------|
| i | Orígenes (Empresas productoras de azúcar crudo) | 1 | Panchito Gómez |
| | | 2 | Héctor Rodríguez |
| | | 3 | Abel Santa María |
| | | 4 | Heriberto Duquesne |
| | | 5 | Ifraín Alfonso |
| j | Destinos (Refinerías de la provincia Villa Clara) | 1 | Washington |
| | | 2 | Quintín |
| | | 3 | Chiquitico |
| | | S | Subsistema Héctor |

Fuente: (Elaboración propia)

Capítulo III: “Desarrollo y aplicación del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”



De acuerdo con la información expuesta en la tabla anterior es necesario aclarar que se denota al subsistema de Héctor con la letra (S), con vistas a no interpretar de forma incorrecta la escritura matemática, debido a que el mismo es un intermediario en la red logística y tiene función de destino para los centrales y de origen para la salida del azúcar crudo hacia las refinерías, como fue explicado en el epígrafe 2.3 del capítulo anterior.

Normalmente en estos modelos se tiene en cuenta el medio de transporte a utilizar, pero en este caso no resulta necesario por lo explicado en el capítulo anterior. Además, las tarifas están expresadas en función de pesos por toneladas independientemente del medio empleado.

El conjunto de restricciones del modelo se definen de forma general a continuación, no obstante en el **(Anexo 5)** de este trabajo se muestra el diseño del modelo en el WinQSB.

Restricciones

- a) Capacidad de obtención de azúcar crudo en cada origen (i) en la zafra (Ci): $\sum X_{ij} \leq C_i$
- b) Total de azúcar crudo enviado a cada destino (j) en la zafra (Nj): $\sum X_j = N_j$
- c) Cantidad de azúcar crudo enviado desde cada origen (i) en la zafra (Di): $\sum X_i = D_i$

Para obtener las capacidades totales de cada central o refinерía expresadas en toneladas de crudo, se parte de los datos de la tabla 3.5. El producto de la norma potencial (columna 2) por el rendimiento promedio de la caña en tanto por uno (columna 3) daría la norma potencial de crudo al día (columna 4). En el caso de las refinерías sería la norma potencial de refinо por 1.12 para que todo quede expresado en toneladas de crudo. Los días totales a trabajar se determinan de manera similar a los especificados en la tabla 3.2, pero añadiendo la disponibilidad de caña de los centrales que no deben arrancar en la zafra y que se asocian a los que si van a funcionar. El criterio para ello es la cercanía. Posteriormente se aplica la expresión 3.2 para obtener la capacidad expresada en toneladas de crudo de toda la zafra en cada central (tabla 3.6).

Tabla 3.5: Datos reales usados

| Centrales | Norma Potencial (t caña/día) | Rendimiento promedio de la caña (%) | Norma potencial (t crudo/día) | Días totales |
|---------------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------|
| Panchito Gómez Toro | 3795 | 10.67 | 405 | 121 |
| Héctor Rodríguez | 4600 | 10.88 | 500.5 | 124 |
| Abel Santa María | 2645 | 10.83 | 286.5 | 115 |
| Heriberto Duquesne | 2700 | 9.71 | 262.2 | 101 |
| Ifraín Alfonso | 3450 | 11.31 | 390.2 | 131 |
| Refinerías | Cap:(t refinо/día) | Conversión | | |

Capítulo III: “Desarrollo y aplicación del modelo matemático de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara”



| | | | | |
|---------------------|-----|-----------------------|-------|-----|
| George Washington | 320 | | 358.4 | 203 |
| Quintín Banderas | 320 | 1.12 t (crudo/refino) | 358.4 | 178 |
| Chiquitico Fabregat | 195 | | 218.4 | 80 |

Fuente: (Elaboración propia a partir de documentos del Grupo Empresarial Agroindustrial)

$$C_t = N_p * D_t / 100 \quad (3.2)$$

Donde:

Ct: capacidad total de la zafra de cada central en toneladas de crudo

Np: Norma potencial en toneladas de crudo al día

D: Cantidad de días de zafra.

Aplicando la expresión anterior se obtienen los resultados de la siguiente tabla, los cuales fueron utilizados para elaborar las restricciones de capacidad en el modelo.

Tabla 3.6: Capacidades totales por centrales y refinerías

| Centrales | Capacidades totales (t) |
|---------------------|-------------------------|
| Panchito Gómez Toro | 49005 |
| Héctor Rodríguez | 62062 |
| Abel Santa María | 32947.5 |
| Heriberto Duquesne | 26482.2 |
| Ifraín Alfonso | 51116.2 |
| Refinerías | |
| George Washington | 72755.2 |
| Quintín Banderas | 63795.2 |
| Chiquitico Fabregat | 17472 |

Fuente: (Elaboración propia)

Una vez obtenida la tabla 3.6 se está en condiciones de elaborar el modelo matemático, cuya formulación aparece en la tabla 3.7.

Condición de no negatividad: $X_{ij} \geq 0$

Tabla 3.7: Ecuaciones del modelo.

| Función Objetivo | | | |
|--|-------------------------|-------------------------------------|----------------|
| $Min(Z) = C_{12} * X_{12} + C_{1S} * X_{1S} + C_{2S} * X_{2S} + C_{3S} * X_{3S} + C_{33} * X_{33} + C_{4S} * X_{4S} + C_{43} * X_{43} + C_{51} * X_{51} + C_{S1} * X_{S1} + C_{S2} * X_{S2} + C_{S3} * X_{S3}$ | | | |
| Restricción de Capacidad | | | |
| $X_{12} + X_{1S} \leq C_1$ | $X_{2S} \leq C_2$ | $X_{3S} + X_{33} \leq C_3$ | |
| $X_{4S} + X_{43} \leq C_4$ | $X_{51} \leq C_5$ | $X_{S1} + X_{S2} + X_{S3} \leq C_S$ | |
| Restricción de envío total a cada destino (j) | | | |
| $X_{S1} + X_{51} = N_1$ | $X_{12} + X_{S2} = N_2$ | $X_{S3} + X_{33} + X_{43} = N_3$ | $X_{2S} = N_S$ |
| Restricción de envío total desde cada origen (i) | | | |
| $X_{12} + X_{1S} = D_1$ | $X_{2S} = D_2$ | $X_{3S} + X_{33} = D_3$ | |
| $X_{4S} + X_{43} = D_4$ | $X_{51} = D_5$ | $X_{S1} + X_{S2} + X_{S3} = D_S$ | |

Fuente: (Elaboración propia)

3.4 Solución

Luego de confeccionadas las ecuaciones del modelo, se prosigue tal y como se planteó en el epígrafe 2.6 del capítulo 2 de esta investigación, en este paso se utiliza la programación lineal que fue la técnica seleccionada en el subepígrafe 3.2.3. Haciendo uso del software WinQSB se obtiene la solución reflejada en el (**Anexo 6**).

3.5 Verificación, validación y refinamiento

Tal como se abordó en el capítulo anterior, en esta etapa se refina el modelo a través de una prueba exhaustiva del mismo, la cual permitió comprobarlo y a su vez que los resultados obtenidos fueran razonables. Como todo proceso de modelación no siempre se obtuvo la solución a partir de la primera vez, fue necesario entonces rectificar varias veces el modelo transitando por un conjunto de situaciones en su desarrollo, ya que llevar la realidad a un conjunto de transformaciones numéricas vino aparejado de que en unas cuantas ocasiones se tuviera que rediseñar o transformar algunas de sus especificaciones matemáticas hasta lograr expresar mediante ellas lo que en la realidad ocurre. Después de todo un largo trayecto hasta la obtención de la solución del anexo 6, se pasa entonces a la validación del modelo, paso fundamental dentro de esta etapa pues a través de ella se puede verificar si se logró alcanzar el objetivo propuesto de buscar una alternativa de distribución que validara o mejorara el procedimiento que se sigue actualmente. En la tabla 3.8 se muestra el costo total asociado a las toneladas totales distribuidas en la zafra 2010-2011 por parte de la empresa comercializadora TECNOAZUCAR hasta el 24 de mayo de 2011 y el que proporciona la solución del modelo matemático diseñado en el software WinQSB.

Tabla 3.8. Costos totales de distribución de azúcar crudo

| Variantes de distribución | Toneladas distribuidas | Costo total (\$) | Ahorro (\$) |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------|
| TECNOAZUCAR | 120654.2 | 638993.926 | 20338.126 |
| Solución del WinQSB | 120654.2 | 618655.8 | |

Fuente: (Elaboración propia)

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la solución según el modelo matemático diseñado en el WinQSB reduce el costo de distribución de azúcar crudo en la provincia de Villa Clara en \$20338.126.

3.6 Interpretación y análisis de los resultados

Es justo aclarar, que aun cuando se verificó que el modelo refleja el sistema real, el mismo no considera las perturbaciones que tradicionalmente ocurren durante el período de zafra. Ello implica que el ahorro especificado en el paso anterior sería mucho menor, pues generalmente para mantener funcionando los centrales y las refinerías, cuando alguno no puede abastecer

alguna refinería, se precisa llevar el crudo desde otro o desde el subsistema, aun cuando su costo sea mayor. Ello ocurre porque el incremento de costo en que se incurre, siempre será menor que la parada de una refinería o de un central azucarero. Es por ello, que el modelo elaborado tiene su mayor utilidad en el proceso de planeación para obtener la red de distribución y en base a esa solución, tomar diferentes decisiones en el transcurso de la zafra, tratando siempre de no alejarse de la misma.

3.7 Implantación, documentación y mantenimiento

El presente trabajo forma parte de un proyecto territorial CITMA, por lo que esta fase de trabajo aun está pendiente. No obstante, durante el desarrollo de la tesis se trabajó con los especialistas que realizan la actividad de distribución y ya los mismos están familiarizados con el propósito y desarrollo de la presente tesis.

3.8 Conclusiones parciales

- 1) Se logró validar el procedimiento propuesto en el segundo capítulo, al ser modelada y resuelta mediante la programación lineal, la red de distribución para la obtención de azúcar refino en la provincia Villa Clara, donde los resultados alcanzados representan un ahorro de \$20338.126 respecto al procedimiento actual de distribución.
- 2) El modelo propuesto sirve esencialmente como herramienta de planeación de la red logística de distribución estudiada. Por ello, el ahorro anterior debe ser en la práctica un poco menor pero aun así le debe facilitar sustancialmente el trabajo a los especialistas que trabajan en este proceso.

Conclusiones generales

Conclusiones generales

- 1) Existe toda una base teórico conceptual para la solución de problemas de distribución que van desde procedimientos elementales como el método del Barrido, pasando por algoritmos de optimización y llegando hasta las metaheurísticas. Sin embargo, cada problema concreto posee sus particularidades por lo que la herramienta apropiada será diferente en cada caso.
- 2) La distribución de azúcar crudo para la producción de azúcar refino constituye un sistema logístico complejo, dada la cantidad de variables y restricciones que el mismo presenta. Actualmente los especialistas encargados de este trabajo lo realizan tomando como base su experiencia de varios años, lo que no excluye el empleo de otras herramientas para validar o mejorar las decisiones que sistemáticamente se adoptan.
- 3) El procedimiento propuesto en el segundo capítulo de la tesis permitió modelar la situación de la distribución del azúcar crudo para producir azúcar refino en la provincia de Villa Clara, ratificándose en el mismo varios de los pasos de trabajo y cálculos que actualmente se realizan, añadiéndose a los mismos el modelo propuesto.
- 4) La solución del modelo utilizando la programación y apoyado en el software WINQSB, fue obtenida finalmente luego de varias corridas y rectificaciones. La misma permite afirmar que el modelo obtenido es una buena representación del sistema real y en consecuencia es válido para la toma de decisiones, esencialmente en la etapa de planeación de la red logística de distribución para la producción de azúcar refino en la provincia de Villa Clara.
- 5) La comparación entre los resultados reales de la actual zafra y los del modelo desarrollado en la presente tesis, reflejaron un ahorro de \$20338.126 a favor de la solución del modelo, aunque en la práctica este resultado debe ser menor, en tanto el modelo no refleja el conjunto de perturbaciones que tradicionalmente ocurren durante el período de zafra.
- 6) La hipótesis propuesta en el trabajo fue validada y los objetivos planteados fueron cumplidos, al ser lograda la modelación del sistema de distribución de azúcar crudo para la producción de azúcar refino en la provincia de Villa Clara. Ello además permitió validar algunos pasos y cálculos que actualmente se realizan por los especialistas implicados y en el caso de las decisiones referidas a la distribución varias de ellas fueron mejoradas.

Recomendaciones

Recomendaciones

De las conclusiones finales de la tesis y de su propia culminación se recomienda:

- 1) Aplicar el modelo elaborado para la distribución del azúcar crudo para la producción de azúcar refinado en la provincia de Villa Clara, en su fase de planeación, de manera que pueda servir de patrón a los especialistas encargados de la actividad, para la toma de decisiones durante el período de zafra.
- 2) Continuar con el estudio realizado, para incorporar el empleo de biomasa con fines energéticos en el período de zafra, de manera que quede unificado al problema de la distribución, para lo cual debe partirse de las soluciones brindadas por el modelo propuesto.
- 3) Presentar los resultados obtenidos en el trabajo, en el Forum de Ciencia y Técnica y en los eventos que convoca la Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba (ATAC), así como en otros eventos científicos que se realicen en el territorio y que preferentemente estén referidos a la logística.
- 4) Mantener la presente tesis como documento de consulta para estudiantes y profesionales que de una u otra forma se relacionen con la Logística y la Investigación de Operaciones, así como para los directivos y trabajadores del MINAZ en la provincia, en tanto varios de ellos contribuyeron a la realización del presente estudio.

Bibliografía

Bibliografía

1. Ballou, H. R. (1991). La logística empresarial. Control y Planificación. Madrid: Díaz de Santos.
2. Bello Fernández, Y. y González Oquendo Y, (2009). *Procedimiento multicriterio para el diseño, implantación y control de rutas. Aplicación a la distribución de la leche concentrada y el yogurt de soya en la Empresa de Productos Lácteos "La Villareña" de Santa Clara*. Trabajo de Diploma. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
3. Calvo Reyes, Y, (2009). *Procedimiento general para el ruteo de vehículos en la distribución de productos. Aplicación parcial en la Pasteurizadora Placetás*. Trabajo de Diploma. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
4. Camarena Gallardo, P, (2001). La modelación matemática en el ambiente de aprendizaje: una innovación. ESIME – IPN. México. (En línea). Disponible en:
http://www.ciie.cfiie.ipn.mx/2domemorias/documents/m/.../m13a_28.pdf
(Accesado el 2 de marzo de 2011)
5. Cespón Castro, R. & Auxiliadora Amador, M. (2003). *Administración de la cadena de suministros*. Manual para estudiantes de la especialidad de Ingeniería Industrial. Tegucigalpa, Universidad Tecnológica Centroamericana de Honduras, UNITEC.
6. Comas Pullés, R. (1996) La logística, origen, desarrollo y análisis sistémico. Revista Logística Aplicada No. 1. Editada por la SCLM-ANEC. Cuba.
7. Comas Pullés, R. (1998) Cuba, globalización y logística. Revista Logística Aplicada No. 4. Editada por SCLM-ANEC. Cuba.
8. Conejero González, H. C. (1997) *Proyección tecnológica de las Bases de Recuperación de Materias Primas*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
9. Council of Logistic Management, (2000). Disponible en: <http://www.clm.org>
(Accesado el 26 de noviembre de 2010).
10. CSCMP (2005). Supply Chain and Logistics Terms and Glossary. Council of Supply Chain Management Professional. Disponible en: <http://www.cscmp.org>
(Accesado el 26 de noviembre 2010).
11. Delgado Sobrino, D, (2009). *Procedimiento general para el diseño, implantación y control de rutas en cadenas de productos lácteos. Aplicación a la distribución de productos de la Pasteurizadora de Sancti Spiritus*. Tesis presentada en opción al grado científico de

Bibliografía

- Master en Ingeniería Industrial. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
12. Domínguez Calle, E, A, (2010). "Fundamentos para la Modelación Matemática de Sistemas Complejos", "5, 7, 8, 9, 10".(En línea).Disponible en:
<http://www.carusso.narod.ru/Nociones>
(Accedido el 11 de noviembre de 2010).
13. Estrada, M, (2007)"*Redes de distribución*". (En línea). Disponible en:
<http://www.buenastareas.com/ensayos/Redes-De-Distribucion>
(Accesado el 25 de noviembre del 2010).
14. Fowler Casademont, R. (2010) *Procedimiento general para el ruteo de vehículos a partir de la conformación de la carga. Aplicación en la distribución de productos en la Pasteurizadora Placetás*. Trabajo de diploma. Santa Clara, Universidad Central "Martha Abreu" de las Villas.
15. Garza Ríos R. C. (2001). *Procedimiento multicriterio para la planificación de las rutas de distribución*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. La Habana, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría.
16. Glover, F. & Laguna, M. (1997). Tabú Search. Kluwer Academic Publishers.
17. Gómez Acosta, M. & Acevedo Suárez, J.A. (2001/a). La logística moderna y la competitividad empresarial. LOGESPRO. CETA. Ediciones Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría. La Habana, Cuba.
18. González González, R., et al. (1998) Transporte: Elemento clave en la gestión logística. Logística Aplicada No 4. pp. 9-18. Ciudad de la Habana.
19. González Vargas, G. y González Aristizábal, F. (2007). "Metaheurísticas aplicadas al Problema de Ruteo de Vehículos". Un caso de estudio. Parte 2: Algoritmo genético, comparación con una solución heurística en *Revista Ingeniería e Investigación*. (En línea). Vol. 27, No.1, pp.149-157.Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/643.pdf>
(Accesado el 25 de febrero de 2011).
20. Knudsen González, J.A. (2005). *Diseño y gestión de la cadena de suministro de los residuos de la agroindustria de la caña de azúcar. Aplicación a los residuos agrícolas cañeros, el bagazo y las mieles*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
21. Lieberman, G. & F. Hiller, (2007) "*Introducción a la Investigación de Operaciones*". Tomo 1, quinta edición, La Habana, Félix Varela.

Bibliografía

22. Marrero Delgado, F. (2001). *Procedimiento para la toma de decisiones logísticas con enfoque multicriterio en la cadena de corte, alza y tiro de la caña de azúcar. Aplicaciones en la provincia de Villa Clara*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
23. Martínez Agra, D, (2008) "*Localización de centros de intercambio modal y plataformas logísticas*". Tesis de especialidad. Barcelona. Departament d'Infraestructura del Transport del Territori, Universitat Politècnica de Catalunya. (En línea). Disponible en: <http://www.buenastareas.com/ensayos/Redes-De-Distribucion>
(Accesado el 25 de noviembre del 2010)
24. Meneses Marcel, J, C (2009). *Perfeccionamiento de las rutas de distribución de la Empresa Suchel Trans de Sancti Spíritus utilizando el algoritmo de optimización por colonia de hormigas*. Tesis en opción al grado científico de Master. Santa Clara, Universidad Central "Martha Abreu" de las Villas.
25. Moraga Suazo, R. J., et al. (2003). "Un enfoque de solución eficaz para problemas combinatorios" en *Revista Ingeniería Industrial*. (En línea). No 1. Disponible en: http://www.ici.ubiobio.cl/revista/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=23&temid=3
(Accesado el día 27 de febrero de 2011)
26. Pachares Nolivos, M, G; Villalva Cárdenas, M, M; Paredes Hasing, X, A, (2009). *Red de Distribución de Medicamentos en la Ciudad de Guayaquil*. Tesis de grado. Guayaquil, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Facultad ICHIE. (En línea). Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/5689>.
(Accesado el 25 de Febrero del 2011).
27. Planchart Márquez, O, (2005). "Alternativa didáctica en la enseñanza del precalculo" en *revista 360 de Investigación en Ciencias y Matemáticas*. (En línea). Vol.1. México. Disponible en: <http://cremc.ponce.inter.edu/360/index.htm>.
(Accesado el 2 de marzo de 2011).
28. Ramos, A., et al. (2010). Modelos matemáticos de optimización. Escuela técnica superior de ingeniería. Departamento de Organización Industrial. Madrid. (En línea). Disponible en: http://www.gams.com/docs/contributed/modelado_en_gams.pdf
(Accesado el 2 de marzo de 2011).

Bibliografía

29. Resolución No. 217, (2004). Disposiciones generales de las tarifas de transporte por camiones, de carga general y contenedores. Ministerio de Finanzas y Precios de la República de Cuba.
30. Reyes Rojas, M (2003). La logística aplicada. (En línea). Disponible en: <http://www.promonegocios.net/distribución/definicion - distribución.html> (Accesado el 25 de noviembre de 2010)
31. Rodríguez Rodríguez, A, (2010) *El problema del ruteo de vehículos: teoría y aplicaciones en el sector empresarial cubano*. Trabajo de diploma. Santa Clara, Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas.
32. Sáez Mosquera, I. et al. (2000). Distribución óptima de combustible por zonas y tipos de clientes. Una aproximación. Evento Logística 2000. Ciudad de la Habana.
33. Santos Norton, M. L. (1997) Tesis en opción al grado de Doctora en Ciencias Técnicas. La Habana, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría.
34. Torres Cedeño, D, (2009). *Procedimiento general para el diseño, implantación y control de rutas en cadenas de suministro de productos lácteos. Aplicación a la cadena del yogurt de soya en el combinado lácteo de Ciego de Ávila*. Trabajo de Diploma. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
35. Torres Gemeil, M. et al. (2003). Logística. Temas Seleccionados. Tomo I. Primera.
36. Torres Gemeil, M., Mederos Cabrera, B. Daduna, R. Comas Pullés, R. (2003) Generalidades sobre logística. Logística: temas seleccionados, Tomo I. ISBN 959-250-100-9. Editorial Universitaria.

| Anexo 1. Definiciones sobre logística |
|--|
| Ballou (1991) |
| La Logística Empresarial abarca todas las actividades relacionadas con el traslado - almacenamiento de productos que tiene lugar entre los puntos de adquisición y los puntos de consumo |
| Council of Logistics Management (2000) |
| La logística es el proceso de planificar, implementar, controlar el flujo y el almacenaje de materias primas, productos semielaborados o terminados, y de manejar la información relacionada desde el lugar de origen hasta el lugar de consumo, con el propósito de satisfacer los requerimientos de los clientes |
| Gómez Acosta y Acevedo Suárez (2001) |
| Es la acción del colectivo laboral dirigida a garantizar las actividades de diseño y dirección de los flujos material, informativo y financiero desde sus fuentes de origen hasta sus destinos finales, que deben ejecutarse de forma racional y coordinada con el objetivo de proveer al cliente de productos y servicios en la cantidad, calidad, plazos y lugar demandados con elevada competitividad y garantizando la preservación del medio ambiente |
| Cespón Castro & Auxiliadora Amador (2003) |
| "Logística, es el proceso de gestionar los flujos material e informativo de materias primas, inventario en proceso, productos acabados, servicios y residuales desde el suministrador hasta el cliente, transitando por las etapas de gestión de los aprovisionamientos, producción, distribución física y de los residuales" |
| Torres Gemeil et al. (2003) |
| "Es un sistema que garantiza el flujo eficiente de materiales o personas y de su información asociada desde un origen o fuente hasta un cliente o destino, incluyendo un flujo financiero" |
| Council of Supply Chain Management Professionals (2005) |
| La logística es aquella parte de la gestión de la cadena de suministro que planifica, implementa y controla el flujo y almacenamiento eficiente de bienes, servicios e información, desde el punto de origen al punto de consumo, para satisfacer los requerimientos del cliente |

Anexos

Anexo1. Continuación

| |
|--------------------------------|
| Knudsen González (2005) |
|--------------------------------|

| |
|---|
| “Es aquella parte de la gestión de la cadena de suministros que planifica, implementa y controla el flujo y almacenamiento eficiente de bienes, servicios e información desde el punto de origen hasta el punto de consumo para añadir valor al cliente con elevada competitividad y garantizando la preservación del medio ambiente” |
|---|

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura científica especializada

Anexo 2: Técnicas usadas en el ruteo

| Utilidad | Técnica recomendada | Tipo de técnica |
|--|------------------------------------|-----------------|
| Origen y destino (Diferentes) | Algoritmo de Ford | Aproximado |
| | Método de Bellman-Kalaban | Aproximado |
| | Método de Floyd | Aproximado |
| | Método de la Matriz | Exacto |
| | Método tabular | Aproximado |
| Múltiples puntos Origen-destino | Método de transporte | Aproximado |
| | Método de producción transporte | Aproximado |
| Coincidencia de puntos Origen - destino | Algoritmo del barrido | Aproximado |
| | Método de Clark y Wright | Heurístico |
| | Método de Kart y Thompson | Heurístico |
| | Método de Lemaire | Heurístico |
| | Método de Lin y Kernighan | Heurístico |
| | Método de Ferguson | Heurístico |
| | Método de Doll | Aproximado |
| | Método de Bodin, Daouley y Stewart | Aproximado |
| | Método de Gaskell | Exacto |
| | Método de Held y Karp | Exacto |
| | Método de Christofides y Ginozza | Exacto |
| Método de Crowder y Fadberg | Exacto | |

Fuente: Tomado de Delgado Sobrino (2009)

Anexo 3: Características esenciales de los métodos

| Métodos exactos | |
|----------------------------|---|
| Limitaciones | <p>Su aplicabilidad está limitada por diferentes suposiciones que se hacen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La certidumbre de toda la información implicada en el problema se conoce con certeza • Si la función objetivo es lineal se asume que el costo unitario, precio o beneficio no le afectan los cambios en las cantidades producidas o vendidas • Cuando el tamaño de las rutas de los vehículos, en cuanto al número de nodos en las rutas o el número de vehículos es demasiado grande, el modelo lineal elegido se hace no adecuado para resolver el problema |
| Ventajas | <ul style="list-style-type: none"> • Es una herramienta utilizable para resolver problemas típicos de la complejidad computacional, siendo capaces de encontrar, si existe, el óptimo absoluto • Tales problemas son muy comunes y extremadamente importantes en las empresas y organizaciones |
| Desventajas | <ul style="list-style-type: none"> • No son factibles para instancias de grande porte, debido a la complejidad computacional que los caracteriza • Su solución es difícil por el hecho de que puede existir un número infinito de soluciones posibles. De ahí que son métodos muy complejos en su resolución, su uso tiende a ser computacionalmente muy costoso en tiempo |
| Aplicación | Aplicable a problemas de programación matemática, en el caso específico de la programación lineal entera, binaria o mixta |
| Métodos Aproximados | |
| Limitaciones | <ul style="list-style-type: none"> • No todos son adecuados para todas las aplicaciones prácticas, a menudo utilizan herramientas de programación lineal entera y programación semidefinida para su solución, estructuras de datos complejas o técnicas de algoritmos sofisticadas que tienden a dificultar los problemas de implementación • Algunos poseen tiempos de ejecución poco prácticos, a pesar de |

Anexo 3. Continuación

| | |
|-----------------|--|
| | <p>ser polinómicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Solo es aplicable a problemas de optimización y no a los de decisión en estado puro |
| Ventajas | <ul style="list-style-type: none"> • Es capaz de encontrar una solución rápidamente, no necesariamente óptima |

Anexos

| | |
|----------------------------|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Una solución aproximada suele ser suficientemente buena, especialmente cuando el tiempo requerido para encontrar la solución óptima es considerable |
| Desventajas | Encontrar una buena aproximación puede ser suficiente para resolver el problema, pero por estar dentro de un cierto rango de prueba y error que puede considerarse en muchos casos lejanos de la solución óptima, suele convertirse en una desventaja indiscutible |
| Aplicación | Aplicable solo a los problemas de optimización, para encontrar soluciones aproximadas, con mejores resultados |
| Métodos Heurísticos | |
| Limitaciones | Realizan una exploración limitada del espacio de búsqueda, lo cual muchas veces implica un mayor tiempo de procesamiento |
| Ventajas | <ul style="list-style-type: none"> • Busca buenas soluciones a problemas reales complejos, con resultados cercanos al óptimo a un costo computacional razonable • En el caso de las metaheurísticas que se incluyen en este tipo de método, se dice que las mejores pueden llegar a obtener soluciones menores al 0.5% de desviación respecto al óptimo • Es un método flexible que permite la incorporación de condiciones de difícil modelización; bastante rápido, adaptable y fácil de entender |
| Desventajas | <ul style="list-style-type: none"> • No garantiza optimalidad absoluta del resultado que se obtiene • En el caso de las heurísticas clásicas, suelen proporcionar el empeoramiento de la solución e incluso soluciones intermedias no factibles en el proceso de búsqueda • No existe medida de calidad de la respuesta |

Anexo 3. Continuación

| | |
|-------------------|--|
| Aplicación | Aplicable en cualquier ciencia, ya sea la genética, la biología, la inteligencia artificial, las matemáticas, la física y la neurología, etc |
|-------------------|--|

Fuente: Tomado de Rodríguez Rodríguez (2010)

Anexo 4: Características principales de las técnicas

| | |
|----------------------|---|
| Técnica | Algoritmo de Ford |
| Clasificación | Aproximado |
| Aplicabilidad | Origen y destino diferentes |
| Limitaciones | <ul style="list-style-type: none"> • Poseen tiempos de ejecución poco prácticos, a pesar de ser polinómicos • El uso de herramientas de programación lineal entera, estructuras de datos complejas, suelen dificultar los problemas de implementación |
| Ventajas | Fácil de mecanizar para las redes que poseen un gran número de vértices: caso del estudio sistemático de un grupo nutrido de individuos |
| Desventajas | La solución obtenida por estar dentro de un cierto rango de prueba y error que puede considerarse en muchos casos lejanos de la solución óptima, suele ser una desventaja indiscutible |
| Técnica | Método de Bellman-Kalaban |
| Clasificación | Aproximado |
| Aplicabilidad | Origen y destino diferentes |
| Limitaciones | Poseen tiempos de ejecución poco prácticos, a pesar de ser polinómicos |
| Ventajas | Fácil implementación; no requiere memoria adicional y es programable en ordenador |
| Desventajas | Muy lento; muchas comparaciones e intercambios |
| Técnica | Método de Floyd |
| Clasificación | Aproximado |
| Aplicabilidad | Origen y destino diferentes |
| Limitaciones | Poseen tiempos de ejecución poco prácticos, a pesar de ser polinómicos |
| Ventajas | Fácil implementación. Requerimientos mínimos de memoria |
| Desventajas | Lento; numerosas comparaciones |

Anexo 4. Continuación

| | |
|----------------|------------------------------|
| Técnica | Algoritmo del Barrido |
|----------------|------------------------------|

Anexos

| | |
|----------------------|---|
| Clasificación | Aproximado |
| Aplicabilidad | Coincidencia de puntos origen-destino |
| Limitaciones | No tiene en cuenta las distancias a recorrer por el vehículo entre los nodos a distribuir |
| Ventajas | <ul style="list-style-type: none"> • Cada volumen de parada es una pequeña fracción de la capacidad del vehículo • Todos los vehículos tienen el mismo tamaño • No hay restricciones de tiempo en las rutas |
| Desventajas | <ul style="list-style-type: none"> • La solución proporcionada por el algoritmo no es óptima y depende enormemente del cliente escogido para empezar a barrer y del orden en el cual se asignan los vehículos • El alargamiento del plazo de entrega, aumento de los ciclos de viajes |
| Técnica | Algoritmo del Agente Viajero |
| Clasificación | Aproximado |
| Aplicabilidad | Capacidad del vehículo mayor que la demanda total de los puntos a satisfacer |
| Limitaciones | La limitación en cuanto al número de puntos, hace que su complejidad de solución incurra en un tiempo de procesamiento perjudicioso |
| Ventajas | <ul style="list-style-type: none"> • Suelen proporcionar resultados buenos a muchos problemas sin incurrir en un tiempo computacional extremadamente perjudicioso • Es capaz de garantizar el menor ciclo en cuanto a la distancia, el tiempo, el costo, entre otros |
| Desventajas | <ul style="list-style-type: none"> • No llegan a encontrar el resultado óptimo absoluto • No tiene en cuenta las cantidades admisibles a transportar en el medio, ni las demandadas por los diferentes puntos, lo cual repercute en el nivel de servicio al cliente |

Anexo 4. Continuación

| | |
|----------------------|--|
| Técnica | Método de Clark y Wright |
| Clasificación | Heurístico |
| Aplicabilidad | Coincidencia de puntos origen-destino |
| Limitaciones | Realizan una exploración limitada del espacio de búsqueda |
| Ventajas | <ul style="list-style-type: none"> • Genera soluciones con valor de la función objetivo a 2% del óptimo • Puede manejar muchas restricciones prácticas, principalmente porque es capaz de formar rutas y ordenar paradas en las rutas simultáneamente |
| Desventajas | No garantiza optimalidad absoluta del resultado que se obtiene |
| Técnica | Método de Kart y Thompson |
| Clasificación | Heurístico |
| Aplicabilidad | Coincidencia de puntos origen-destino |
| Limitaciones | Realizan una exploración limitada del espacio de búsqueda |
| Ventajas | Busca buenas soluciones a problemas reales complejos, con resultados cercanos al óptimo a un costo computacional razonable |
| Desventajas | No garantiza optimalidad absoluta del resultado que se obtiene |
| Técnica | Algoritmos genéticos |
| Clasificación | Metaheurística avanzada (heurística de búsqueda global) |
| Aplicabilidad | Su utilidad puede ser vista ya sea en la genética, la biología, la inteligencia artificial, las matemáticas, la física y la neurología, etc |
| Limitaciones | Impone la necesidad de tomar decisiones subjetivas para adaptar la función del costo al objetivo realmente buscado |
| Ventajas | <ul style="list-style-type: none"> • Adaptativos: capaces de solucionar problemas que cambian en el tiempo • La facilidad para adaptarse a funciones de costo muy complejas • Permite adaptarse a entornos legales, técnicos y empresariales cambiantes • Buenos exploradores debido a que logran explorar en un espacio grande de búsqueda obteniendo un conjunto de soluciones |

Anexo 4. Continuación

| | |
|----------------------|---|
| Desventajas | <ul style="list-style-type: none"> • La construcción de este algoritmo impone tomar decenas de decisiones de diseño apriorísticas que pueden afectar la eficiencia del algoritmo • Se dice que la inteligencia humana es imprescindible para conseguir una buena solución genética de ahí que a pesar de brindar una solución razonable, es un defecto que dificulta la depuración de programas brindando un resultado razonable con errores de códigos notables • Malos explotadores pues no logran una búsqueda rápida de una solución buena |
| Técnica | Colonia de Hormigas |
| Clasificación | Metaheurística |
| Aplicabilidad | En problemas que pudieran modelarse teniendo en cuenta el comportamiento de las hormigas |
| Limitaciones | Realizan una exploración limitada del espacio de búsqueda, lo cual muchas veces implica un mayor tiempo de procesamiento |
| Ventajas | <ul style="list-style-type: none"> • Buenos para la resolución de problemas de tipo combinatorios • La convergencia rápida, la calidad de las soluciones generadas, hace que sea una opción efectiva para la resolución de problemas pequeños del tipo NP |
| Desventajas | <ul style="list-style-type: none"> • Suelen proporcionar el empeoramiento de la solución e incluso soluciones intermedias no factibles en el proceso de búsqueda • No existe medida de calidad de la respuesta • No garantiza optimalidad absoluta del resultado que se obtiene |
| Técnica | Búsqueda Tabú |
| Clasificación | Metaheurística (de búsqueda local) |
| Aplicabilidad | <ul style="list-style-type: none"> • Utilizada frecuentemente en problemas de optimización combinatoria. • Aplicable exitosamente en problemas prácticos como diseño de circuitos de alta integración, diseño de redes tolerante a fallos |
| Limitaciones | El estancamiento en soluciones localmente óptimas (solución que no puede ser mejorada por un análisis local) |

Anexos

Anexo 4. Continuación

| | |
|----------------------|--|
| Ventajas | Buenos explotadores pues logran una búsqueda rápida de una solución buena |
| Desventajas | Malos exploradores debido a que no logran explorar en un espacio grande de búsqueda que posibilite obtener un conjunto de soluciones |
| Técnica | Programación Lineal |
| Clasificación | Exacto |
| Aplicabilidad | <ul style="list-style-type: none"> • Se puede aplicar a problemas de redes de distribución a través de una variante que es el método de transporte • Es aplicable en diversos problemas de optimización de recursos • Gran aplicabilidad a la asignación de recursos, mezcla de productos y otros |
| Limitaciones | Son modelos lineales |
| Ventajas | Posee un software disponible (WINQSB) y es fácil de aplicar a cualquier entorno |
| Desventajas | <ul style="list-style-type: none"> • Muchas personas desconocen de su existencia y no hacen uso de la misma • El software disponible es de corte académico |

Fuente: Tomado de Rodríguez Rodríguez (2010)

Anexos

Anexo 5. Diseño del modelo en el software WinQSB

| Variable --> | Pan-Quin | Pan-Sub | Abel-Sub | Abel-Chiq | Héctor-Sub | Herib-Chiq | Herib-Sub | Ifra-Washi | Sub-Washi | Sub-Quin | Sub-Chiq | Direction | R. H. S. |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|----------|
| Minimize | 7.03 | 3.32 | 3.32 | 5.34 | 0.81 | 3.97 | 7.95 | 5.18 | 5.91 | 3.97 | 8.28 | | |
| Cap de Panch | 1 | 1 | | | | | | | | | | <= | 49005 |
| Cap de Héctor | | | | | 1 | | | | | | | <= | 62062 |
| Cap de Abel | | | 1 | 1 | | | | | | | | <= | 32947.5 |
| Cap de Herib | | | | | | 1 | 1 | | | | | <= | 26482.2 |
| Cap de Ifraín | | | | | | | | 1 | | | | <= | 51116.2 |
| Cap de Washi | | | | | | | | 1 | 1 | | | <= | 72755.2 |
| Cap de Quin | 1 | | | | | | | | | 1 | | <= | 63795.2 |
| Cap de Chiq | | | | 1 | | 1 | | | | | 1 | <= | 17472 |
| Real de Panch | 1 | 1 | | | | | | | | | | = | 33176.2 |
| Real de Quin | 1 | | | | | | | | | 1 | | = | 54551.12 |
| Real de Abel | | | 1 | 1 | | | | | | | | = | 21359 |
| Real de Chiq | | | | 1 | | 1 | | | | | 1 | = | 17223.68 |
| Real de Herib | | | | | | 1 | 1 | | | | | = | 14259 |
| Real de Ifraín | | | | | | | | 1 | | | | = | 18308 |
| Real de Washi | | | | | | | | 1 | 1 | | | = | 25771.16 |
| Real de Héctor | | | | | 1 | | | | | | | = | 33552 |
| Cap del Sub | | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | <= | 5580000 |
| Real del Sub | | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | | | = | 55562 |
| Distrib Real | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | <= | 120654.2 |
| LowerBound | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| UpperBound | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | | |
| VariableType | Continuous | Continuous | Continuous | Continuous | Continuous | Continuous | Continuous | Continuous | Continuous | Continuous | Continuous | | |

Fuente: Elaboración propia

Anexos

Anexo 6. Solución del software WinQSB

| | Decision Variable | Solution Value | Unit Cost or Profit c(j) | Total Contribution | Reduced Cost | Basis Status | Allowable Min. c(j) | Allowable Max. c(j) |
|----|-------------------|----------------|--------------------------|--------------------|------------------|--------------|---------------------|---------------------|
| 1 | Pan-Quin | 29,560.5200 | 7.0300 | 207,810.5000 | 0 | basic | 1.0300 | M |
| 2 | Pan-Sub | 3,615.6800 | 3.3200 | 12,004.0600 | 0 | basic | -M | 9.3200 |
| 3 | Abel-Sub | 18,394.3200 | 3.3200 | 61,069.1400 | 0 | basic | -2.6800 | 9.3200 |
| 4 | Abel-Chiq | 2,964.6800 | 5.3400 | 15,831.3900 | 0 | basic | -0.6600 | 11.3400 |
| 5 | Héctor-Sub | 33,552.0000 | 0.8100 | 27,177.1200 | 0 | basic | -M | M |
| 6 | Herib-Chiq | 14,259.0000 | 3.9700 | 56,608.2300 | 0 | basic | -M | 9.9700 |
| 7 | Herib-Sub | 0 | 7.9500 | 0 | 6.0000 | at bound | 1.9500 | M |
| 8 | Ifra-Washi | 18,308.0000 | 5.1800 | 94,835.4400 | 0 | basic | -M | M |
| 9 | Sub-Washi | 7,463.1600 | 5.9100 | 44,107.2700 | 0 | basic | -M | M |
| 10 | Sub-Quin | 24,990.6000 | 3.9700 | 99,212.6900 | 0 | basic | -M | 9.9700 |
| 11 | Sub-Chiq | 0 | 8.2800 | 0 | 6.0000 | at bound | 2.2800 | M |
| | Objective | Function | (Min.) = | 618,655.8000 | | | | |
| | Constraint | Left Hand Side | Direction | Right Hand Side | Slack or Surplus | Shadow Price | Allowable Min. RHS | Allowable Max. RHS |
| 1 | Cap de Panch | 33,176.2000 | <= | 49,005.0000 | 15,828.8000 | 0 | 33,176.2000 | M |
| 2 | Cap de Héctor | 33,552.0000 | <= | 62,062.0000 | 28,510.0000 | 0 | 33,552.0000 | M |
| 3 | Cap de Abel | 21,359.0000 | <= | 32,947.5000 | 11,588.5000 | 0 | 21,359.0000 | M |
| 4 | Cap de Herib | 14,259.0000 | <= | 26,482.2000 | 12,223.2000 | 0 | 14,259.0000 | M |
| 5 | Cap de Ifraín | 18,308.0000 | <= | 51,116.2000 | 32,808.2000 | 0 | 18,308.0000 | M |
| 6 | Cap de Washi | 25,771.1600 | <= | 72,755.2000 | 46,984.0400 | 0 | 25,771.1600 | M |
| 7 | Cap de Quin | 54,551.1200 | <= | 63,795.2000 | 9,244.0780 | 0 | 54,551.1200 | M |
| 8 | Cap de Chiq | 17,223.6800 | <= | 17,472.0000 | 248.3203 | 0 | 17,223.6800 | M |
| 9 | Real de Panch | 33,176.2000 | = | 33,176.2000 | 0 | 3.0600 | 3,615.6800 | 33,176.2000 |
| 10 | Real de Quin | 54,551.1200 | = | 54,551.1200 | 0 | 3.9700 | 29,560.5200 | 63,795.2000 |
| 11 | Real de Abel | 21,359.0000 | = | 21,359.0000 | 0 | 3.0600 | 2,964.6800 | 21,359.0000 |
| 12 | Real de Chiq | 17,223.6800 | = | 17,223.6800 | 0 | 2.2800 | 14,259.0000 | 17,472.0000 |
| 13 | Real de Herib | 14,259.0000 | = | 14,259.0000 | 0 | 1.6900 | 0 | 14,259.0000 |
| 14 | Real de Ifraín | 18,308.0000 | = | 18,308.0000 | 0 | -0.7300 | 0 | 18,308.0000 |
| 15 | Real de Washi | 25,771.1600 | = | 25,771.1600 | 0 | 5.9100 | 18,308.0000 | 72,755.2000 |
| 16 | Real de Héctor | 33,552.0000 | = | 33,552.0000 | 0 | 0.5500 | 3,991.4810 | 33,552.0000 |
| 17 | Cap del Sub | 88,015.7700 | <= | 5,580,000.0000 | 5,491,984.0000 | 0 | 88,016.0000 | M |
| 18 | Real del Sub | 55,562.0000 | = | 55,562.0000 | 0 | 0.2600 | 51,946.3200 | 85,122.5200 |
| 19 | Distrib Real | 120,654.2000 | <= | 120,654.2000 | 0.0039 | 0 | 120,654.2000 | M |

Fuente: Elaboración propia