

### 3. Exposición de problemas generales en la logística.

#### 3.1 Introducción.

En la logística existen diversos problemas que comúnmente se presentan. A continuación en la Figura 3.1 se muestra un diagrama que describe 6 de estos problemas que con frecuencia se presentan en la práctica.

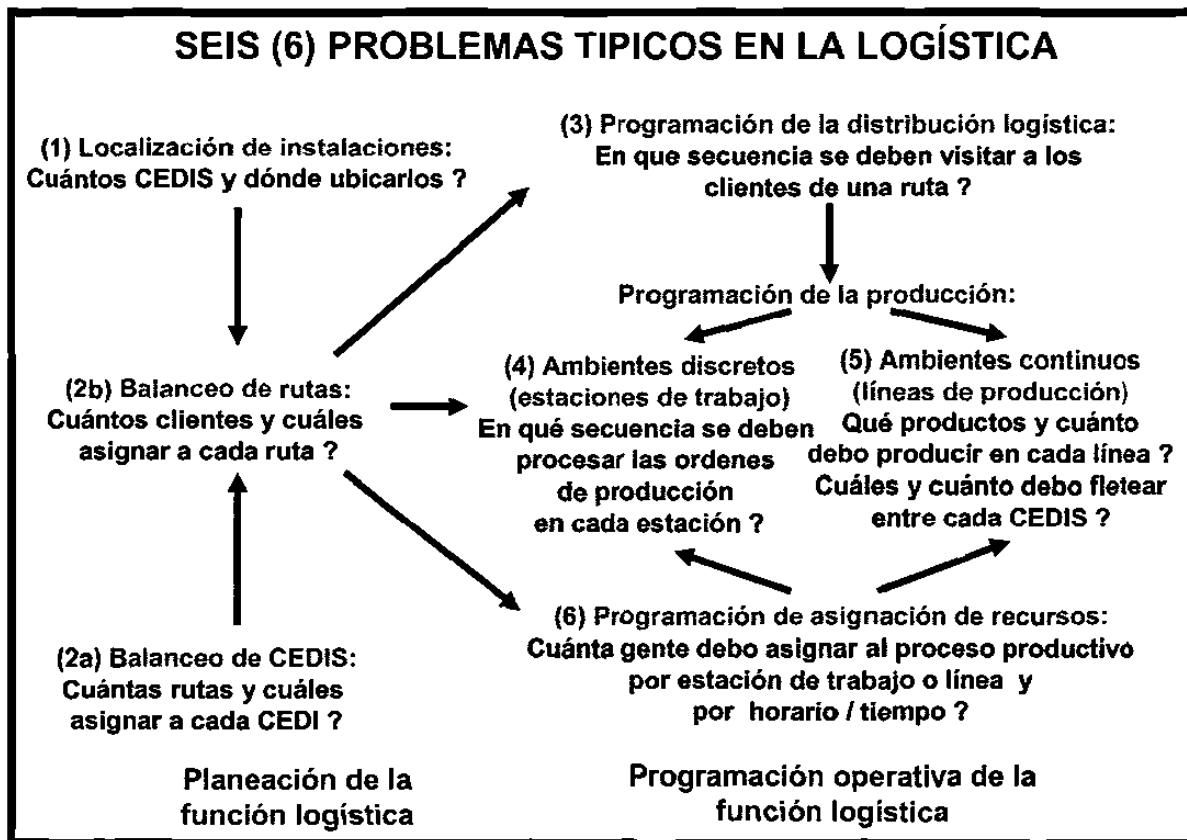


Figura 3.1 Seis problemas generales en la práctica de la logística.

De los 6 problemas expuestos en la figura anterior, a continuación se desarrolla una exposición general de cuatro de éstos. Estos 4 problemas guardan una relación en común la cual se expondrá en el apartado 3.6. La intención de exponer estos 4 problemas es con la finalidad de delimitar cuál será tomado como el problema a desarrollar en el proyecto de investigación. El último apartado corresponde a un estudio de caso mediante el cual se tiene el objetivo de identificar cuál es la oferta de software comercial en la ciudad de Monterrey que se tiene para buscar resolver este tipo de problemas en cuestión. Aunque dicho estudio se desarrolló en mayo del 2002, los resultados previsiblemente siguen siendo validos aún en la actualidad.

### **3.2 Primer problema de la logística: planeación estratégica de red e infraestructura.**

En las empresas de distribución siempre será crítico establecer la ubicación adecuada para todas aquellas instalaciones que darán operatividad al negocio. Aquí nos estamos refiriendo concretamente a las decisiones que tienen que ver con localización de plantas, centros de distribución (CEDIS), nodos de transferencia, bodegas, sucursales, etc. Las decisiones referentes a dónde ubicar este tipo de instalaciones tienen que considerar factores de carácter cualitativo tales como:

1. Viabilidad y tránsito de la zona.
2. Regulaciones en materia de urbanización y uso del suelo.
3. Restricciones referentes a manejo de materiales peligrosos.
4. Plusvalía del terreno.
5. Poder adquisitivo de la zona.
6. Areas potenciales de mercado, crecimientos poblacionales y tendencias de mercado para cada una de las zonas a ser atendidas por los nodos.
7. La conveniencia económica y estratégica que pueda obtenerse en materia de distribución logística una vez que se logre tener el producto más cerca del cliente.

Es importante puntualizar que tener el producto más cerca del cliente y operar con una logística de distribución más ágil, genera una barrera de entrada al resto de los competidores. Así pues, las medidas estratégicas que puedan formularse en términos de un incremento en la efectividad logística, contribuirán en la ventaja competitiva del negocio.

Podemos iniciar buscando contestar a la interrogante acerca de cuál es la cantidad óptima de instalaciones, plantas o CEDIS con la cual el negocio debe operar. Llamaremos de aquí en adelante a esto la cantidad óptima de nodos, los cuales pueden ser categorizados en nodos oferentes (*plantas*) o en nodos demandantes (*almacenes, sucursales*) de acuerdo a la naturaleza de cada uno de éstos.

La dificultad aparece una vez que se comparan los costos de distribución versus los costos fijos de operación de los nodos a ser empleadas para atender la red logística. Es decir, al incrementar la cantidad de nodos que operan en el sistema, es cierto que disminuyen los costos de distribución ya que los productos a ser distribuidos hacia los clientes finales estarán mucho más cerca; pero también entonces es necesario advertir que los costos de operación se incrementarán a consecuencia de tener que operar con una cantidad

mayor de nodos. Entonces el objetivo aquí es encontrar aquella cantidad óptima de nodos que haga que la combinación de ambos costos, es decir, los de distribución que son los costos variables y los de operación en los nodos que son los fijos, ambos sumados den el menor costo total de la red logística.<sup>29</sup>

Cubierta la problemática anterior, luego se añade la dificultad de definir en qué ubicación serán instalados cada uno de los nodos que darán operación a la red de distribución logística. Sin hacer a un lado todas las consideraciones de origen práctico que ya antes se explicaron a este respecto, de una manera conceptual, podemos definir que la ubicación óptima de los nodos estará definida por aquella combinación de ubicaciones que mejor repartan la carga logística y geográfica que cada uno de los nodos tendrá que soportar en términos de distancias, densidades de población, niveles de servicio y políticas de cobertura de demanda a lo largo y ancho de un territorio definido.

Prosiguiendo en la definición de nuestra estrategia de distribución logística, el siguiente aspecto a contemplar corresponde a determinar la cantidad y la delimitación geográfica de aquellas áreas o rutas que serán asignadas a ser atendidas por cada nodo de acuerdo a la ubicación óptima que haya resultado en el razonamiento anterior. Contestar esta interrogante, nos lleva a tener que considerar restricciones de diversa índole tales como las siguientes:

1. Capacidad de almacenamiento, capacidad de flujo entrada y de flujo de salida para cada uno de los nodos de la red.
2. Nivel de equipamiento en cada nodo (montacargas, andenes, equipo para manejo de materiales, transportadores, etc) que servirán para la atención operacional de las rutas a poder ser asignadas.
3. Capacidad de auto-sustentabilidad para cada uno de los nodos para asegurar el servicio y el mantenimiento de la cantidad y el tipo de rutas a ser asignadas (taller mecánico, instalaciones para despacho de combustible, oficinas administrativas, etc.)
4. Consideración de los límites naturales o topográficos que pudieran ser mejor aprovechados para delimitar el territorio de cobertura correspondiente a las rutas a ser atendidas por cada nodo.
5. Nivel de densidad de volumen de demanda y de clientes de los territorios que fuesen a ser asignados a cada CEDIS.

Nuevamente aquí, en términos conceptuales hablaríamos de encontrar aquella combinación que mejor reparta los territorios de las rutas entre cada uno de los nodos que vayan a estar en operación en la red

---

<sup>29</sup> Drezner, Zvi. (1996), *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*, 1st Ed, Springer Verlag, EUA, pag 130-167.

logística. Cuando mencionamos "mejor asignación de los territorios de las rutas", nos estamos refiriendo a aquella combinación que se busca y en la cual obtuviéramos una carga de trabajo razonablemente balanceada entre los nodos de acuerdo a las consideraciones de capacidad y de densidad de demanda antes mencionadas.

Finalmente llegamos al nivel atómico de nuestro plan estratégico logístico. Es aquí cuando debemos determinar la cantidad y la ubicación geográfica de los clientes que serán atendidos por cada una de las rutas que fueron asignadas ya anteriormente a cada uno de los nodos y que también éstos hayan resultado ser los óptimos tanto en cantidad como en ubicación geográfica.

Establecer los clientes a ser asignados a cada ruta conlleva determinar cuáles y por ende cuántos de estos clientes serán atendidos por cada una de las rutas y esto a su vez nos lleva a tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Densidad de la zona en términos de la cantidad de clientes actuales y potenciales.
2. Nivel de demanda en volumen de cada uno de los clientes dentro del territorio.
3. Clasificación y estratificación de los tipos de clientes de acuerdo a la naturaleza del canal comercial que mejor pueda atender.
4. Capacidades de carga (camión, camioneta, automóvil, motocicleta, trailer, etc.) que podrá ser empleada para hacer llegar la distribución física al cliente.
5. Restricciones de vialidad de tránsito de la zona y aspectos de índole topográfico del terreno.
6. Aspectos del tipo cualitativo para la asignación de clientes a un vendedor tales como empatía, concesiones, negociaciones, sindicato, etc)

De igual forma, aquí también en términos conceptuales hablaríamos de encontrar aquella repartición y cantidad óptima de clientes a ser asignada en cada ruta logrando que mejor reparta y balancee la carga de trabajo y el nivel de servicio entre las rutas de acuerdo a las consideraciones antes mencionadas. A continuación se presenta el modelo matemático para la solución del problema en lo referente a la fase de determinación de los clientes que agruparan a cada una de las rutas con la finalidad de balancear las cargas de trabajo entre ellas.

**Balanceo de carga de ruta Multicriterio con Elegibilidad  
(Extensible Two-Dimensional BPP with Eligibility)**

**VARIABLES DE ENTRADA (1 DE 2):**

*Dominios:  $i, j = 1 \dots n$  (Manzanas de un territorio a ser agrupadas)  
 $k = 1 \dots m$  (Rutas a formar en el territorio)*

*$T_{ij}$  = Cantidad de clientes agrupados en las manzanas "i" + "j"*

*$V_{ij}$  = Volumen de ventas agrupado para las manzanas "i" + "j"*

*En ambos casos el valor de la variable tipo "i,j" es la suma aritmética de los clientes y del volumen de ventas agrupado en ambas manzanas "i,j".*

*Para el caso donde "i=j" (diagonal), entonces se suma UNA SOLA VEZ.*

*$A_{ij}$  = Afinidad de la manzana "i" con la manzana "j"*

$$\begin{cases} 0 = \text{La manzana "i" PUEDE ser agrupada con la manzana "j"} \\ 1 = \text{La manzana "i" DEBE ser agrupada con la manzana "j"} \end{cases}$$

*$B_{ij}$  = Afinidad de la manzana "i" con la manzana "j"*

$$\begin{cases} 0 = \text{La manzana "i" PUEDE ser agrupada con la manzana "j"} \\ 1 = \text{La manzana "i" NO DEBE ser agrupada con la manzana "j"} \end{cases}$$

**VARIABLES DE ENTRADA (2 DE 2):**

*$C_{ij}$  = Costo / Colindancia para agrupar la manzana "i" con la manzana "j"*

$$\begin{cases} 0 = \text{La manzana "i" es colindante con la manzana "j"} \\ \infty = \text{La manzana "i" NO es colindante con la manzana "j"} \end{cases}$$

*Donde  $C_{ii} = 0$*

*$CL_k$  = Cantidad mínima de clientes a ser asignados en la ruta "k"*

*$CU_k$  = Cantidad máxima de clientes a ser asignados en la ruta "k"*

*$VL_k$  = Volumen mínimo de ventas a asignar en la ruta "k"*

*$VU_k$  = Volumen máximo de ventas a asignar en la ruta "k"*

### Variables de Salida (1 de 2):

$$X_{ijk} \geq 0, \leq 1, \text{ent} \begin{cases} 0 \rightarrow \text{El cluster "i", "j" NO se va a asignar a la ruta "k"} \\ 1 \rightarrow \text{SI} \end{cases}$$

Donde:  $i, j = 1..n$  (Manzanas a ser agrupadas)

$k = 1..m$  (Rutas a ser formadas)

Dado que la Matriz  $C_{ij}$  es Simétrica entonces:  $X_{ijk} = X_{jik}$ , para:  $j \geq i$

Además es posible explotar la estructura del problema dejando de utilizar una gran cantidad de variables binarias que NO son viables debido a

las colindancias topológicas de la red...

Por ejemplo: si tuviéramos 1000 Manzanas a ser agrupadas en 100 Rutas y usualmente existieran 6 colindancias en promedio para cada manzana:

$$X_{ijk} \text{ Canónico: } 1000 * 1000 * 100 = 100,000,000 \text{ var's}$$

$$X_{ijk} \text{ Simétrico: } \text{aprox } 1000 * 1000 * 100 / 2 = 50,500,000 \text{ var's}$$

$$X_{ijk} \text{ Explotado: } \text{aprox } 1000 * 6 * 100 / 2 = 300,000 \text{ var's}$$

No obstante el espacio de búsqueda sigue siendo enorme, podemos afirmar que el problema empieza a parecer "tratable" computacionalmente hablando.

### Variables de Salida (2 de 2):

$D_c (\geq 0)$  : Tolerancia porcentual negativa referida al # de clientes por ruta.

$S_c (\geq 0)$  : Tolerancia porcentual positiva referida al # de clientes por ruta.

$D_v (\geq 0)$  : Tolerancia porcentual negativa referida al volumen de ventas por ruta.

$S_v (\geq 0)$  : Tolerancia porcentual positiva referida al volumen de ventas por ruta.

### Restricciones (1 de 5):

*Cada manzana debe estar asignada en 2 arcos (i,j):*

\*Para las manzanas primera y ultima en ser agrupadas a la ruta se tendrá  $X_{iik} = 1$  y además el arco  $X_{ijk} = 1$  que sirva para ligar la 1era manzana con la 2da y la penúltima con la última.

\* Para el resto de las manzanas, se tendrán 2 asignaciones, una liga hacia la manzana anterior y otra hacia la manzana siguiente.

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^h X_{ihk} + \sum_{k=1}^m \sum_{j=h+1}^n X_{hjk} = 2$$

para  $h = 1..n$ ; y donde "i", "j" sean colindantes con "h"

*Cada ruta debe tener solamente 2 asignaciones del tipo  $X_{iik} = 1$  (Variables de la Diagonal) :*

\* Una para la manzana "origen" y

\* La otra para la manzana "destino".

$\therefore$  La Ruta NO puede estar picoteada

$$\sum_{i=1}^n X_{iik} = 2$$

para  $k = 1..m$

### Restricciones (2 de 5):

$$\sum_{i=1}^h X_{ihk} + \sum_{i=1}^h X_{ihl} \leq 1 \qquad \sum_{j=h+1}^n X_{hjk} + \sum_{j=h+1}^n X_{hjl} \leq 1$$

{ Cada arco de manzanas "i,h" o "h,j" puede ser asignado a una sola ruta }

para  $h = 1..n$ ;

$k = 1..m$ ;

$l = k+1..m$

y donde "i", "j" sean colindantes con "h"

$$\sum_{i=1}^h X_{ihk} + \sum_{j=h+1}^n X_{hjl} \leq 1 \qquad \sum_{j=h+1}^n X_{hjk} + \sum_{i=1}^h X_{ihl} \leq 1$$

{ Cada manzana "h" puede ser asignada a una sola ruta }

para  $h = 1..n$ ;

$k = 1..m$ ;

$l = k+1..m$

y donde "i", "j" sean colindantes con "h"

### Restricciones (3 de 5):

$$2VL_k^*(1-Dv) \leq \sum_{h=1}^n \sum_{i=1}^h X_{ihk} * V_{ih} \leq 2VU_k^*(1+ Sv)$$

{ para cada ruta "k", el volúmen de ventas asignado debe cubrir el mínimo necesario y no debe exceder del máximo (capacidad de camión). }

para k = 1..m

$$2CL_k^*(1-Dc) \leq \sum_{h=1}^n \sum_{i=1}^h X_{ihk} * T_{ih} \leq 2CU_k^*(1+ Sc)$$

{ para cada ruta "k", la cantidad de clientes asignados debe cubrir el mínimo necesario y no debe exceder del máximo (capacidad de servicio). }

para k = 1..m

En las formulaciones a través de las variables  $T_{ih}$  (# de Clientes) y de

$V_{ih}$  (Volúmen de Ventas)

en ambos casos se requiere dividir entre 2, debido a que cada manzana aparece exactamente en dos agrupaciones.

### Restricciones (4 de 5):

Cuando  $B_{hl} = 1$ , entonces solo cuando mucho 2 arcos podrán estar asignados a la ruta "k", ya sea correspondan a la manzana "h" o a la manzana "l", pero no ambas manzanas podrán estar asignadas para la misma ruta "k".

$$\left( \sum_{i=1}^h X_{ihk} + \sum_{j=h+1}^n X_{hjk} \right) + \left( \sum_{i=1}^l X_{ilk} + \sum_{j=l+1}^n X_{ljk} \right) \leq \frac{LI}{LS}$$

$$0 \quad 4 \quad B_{hl} = 0$$

$$0 \quad 2 \quad B_{hl} = 1$$

para k = 1..m; h = 1..n; l = h+1..n

considerando que las manzanas "i", "j" sean colindantes con "h" y con "l"

$$4(1-B_{hl}) + 2B_{hl} \geq \left( \sum_{i=1}^h X_{ihk} + \sum_{j=h+1}^n X_{hjk} \right) + \left( \sum_{i=1}^l X_{ilk} + \sum_{j=l+1}^n X_{ljk} \right)$$

simplificando...

$$\left( \sum_{i=1}^h X_{ihk} + \sum_{j=h+1}^n X_{hjk} \right) + \left( \sum_{i=1}^l X_{ilk} + \sum_{j=l+1}^n X_{ljk} \right) \leq 4 - 2B_{hl}$$



### Restricciones (5 de 5):

Cuando  $A_{hl} = 1$ ; entonces se restringe a que la diferencia de las 2 expresiones sea igual a 0

∴ Esto equivale a que cuando  $A_{hl} = 1$  solo existan 2 posibilidades :

1. Ambas manzanas "h", "l" se asignan a la ruta "k" o,
2. Ninguna de las 2 manzanas se asigna a la ruta "k".

$$\left( \sum_{i=1}^h X_{ihk} + \sum_{j=h+1}^n X_{hjk} \right) - \left( \sum_{i=1}^l X_{ilk} + \sum_{j=l+1}^n X_{lyk} \right) \quad \begin{array}{l} \overline{LI} \quad \overline{LS} \\ -2 \quad +2 \quad A_{hl} = 0 \\ 0 \quad 0 \quad A_{hl} = 1 \end{array}$$

para  $k = 1..m$ ;  $h = 1..n$ ;  $l = h+1..n$

considerando donde las manzanas "i", "j" sean colindantes con "h" y con "l"

$$\begin{aligned} -2(1-A_{hl}) &\leq \left( \sum_{i=1}^h X_{ihk} + \sum_{j=h+1}^n X_{hjk} \right) - \left( \sum_{i=1}^l X_{ilk} + \sum_{j=l+1}^n X_{lyk} \right) \\ +2(1-A_{hl}) &\geq \left( \sum_{i=1}^h X_{ihk} + \sum_{j=h+1}^n X_{hjk} \right) - \left( \sum_{i=1}^l X_{ilk} + \sum_{j=l+1}^n X_{lyk} \right) \quad \text{luego simplificando...} \end{aligned}$$

$$\left( \sum_{i=1}^h X_{ihk} + \sum_{j=h+1}^n X_{hjk} \right) - \left( \sum_{i=1}^l X_{ilk} + \sum_{j=l+1}^n X_{lyk} \right) \geq 2A_{hl} - 2$$

$$\left( \sum_{i=1}^h X_{ihk} + \sum_{j=h+1}^n X_{hjk} \right) - \left( \sum_{i=1}^l X_{ilk} + \sum_{j=l+1}^n X_{lyk} \right) \leq 2 - 2A_{hl}$$

### Función Objetivo:

$$FO_{min} = P_1 \left[ \sum_{k=1}^m \sum_{h=1}^n \sum_{i=1}^h X_{ihk} * C_{ih} + \sum_{k=1}^m \sum_{h=1}^n \sum_{j=h+1}^n X_{hjk} * C_{hj} \right] +$$

$$P_2 (Dc + Sc) +$$

$$P_3 (Dv + Sv)$$

Donde las manzanas "i", "j" sean colindantes con la manzana "h"

$P_1$  = Nivel de importancia relativa para el objetivo de cumplir con las restricciones topológicas de colidancia en la red.

$P_2$  = Nivel de importancia relativa para el objetivo de cumplir con las restricciones de balanceo de clientes por ruta.

$P_3$  = Nivel de importancia relativa para el objetivo de cumplir con las restricciones de balanceo de volumen de ventas por ruta.

Después de presentar la modelación matemática de cada problema general de la logística, haremos una breve descripción de dicho modelo con el propósito de finalizar la exposición de cada caso en particular. La modelación antes expuesta corresponde a nuestro problema de planificación estratégica de la red logística. En términos taxonómicos el modelo del problema puede ser categorizado como uno de balanceo de carga de ruta multi-criterio con elegibilidad. El problema anterior corresponde a los relacionados al tema de “empacamiento” (o packing en inglés), por tanto el problema corresponde al tipo de problemas difíciles de resolver (o NP-Hard en inglés), de este último tema se hablará más a detalle en el capítulo 5.

El modelo anterior desarrolla algunos conceptos que generalmente son comunes encontrar en el problema de planificación de rutas como son los siguientes:

1. Cantidad de clientes que deben ser atendidos en cada ruta.
2. Volumen de ventas que debe ser abastecido en cada ruta.
3. Criterios de tolerancia permitidas para el balanceo de cargas entre las rutas.

Adicionalmente a lo anterior, el modelo particularmente dedica gran parte de su estructura matemática a atender la afinidad que existe en el agrupamiento de las manzanas que van a formar los territorios de las rutas. El asunto de la afinidad de las manzanas cubre los siguientes aspectos:

1. Las manzanas a ser agrupadas deben guardar una continuidad o colindancia geográfica en el territorio. Lo anterior es con el objetivo de asegurar que los territorios no estén “picoteados”, es decir manzanas que no estén contiguas dentro del territorio.
2. El modelo adicionalmente cubre el caso en el que aunque las manzanas si son contiguas, por razones diversas el planeador desea que no queden agrupadas en la misma ruta.
3. Coincidentemente también el modelo cubre aquel caso en el que el planeador desea el que dos o más manzanas queden agrupadas en una misma ruta.

En general, el modelo dedica mucho de su desarrollo matemático a explotar la estructura del problema. Prueba de ello es que la variable  $X_{ijk}$  es definida en términos de hacer uso de la simetría que existe al agrupar cada par de manzanas. Es decir, resulta conveniente aprovechar el hecho de que las propiedades de planificación que se logran al agrupar una primera manzana con una segunda resultan equivalentes a que cuando se hacen en sentido inverso.

Adicional a lo anterior, el modelo propone como parte de una fase de pre-proceso algorítmico, una heurística bastante conveniente mediante la cual es posible establecer aquellas agrupaciones de manzanas

que resultan ser infactibles debido a la lejanía geográfica relativa que pueda haber entre ellas. La heurística anterior resulta bastante ventajosa ya que como se expone en la modelación, reduce enormemente la cantidad de variables y por consiguiente el tamaño del espacio solución que el algoritmo tuviera que explorar para la búsqueda de la solución óptima.

Cabe puntualizar que al ser definida simétricamente la variable " $X_{ijk}$ ", se tiene el beneficio de reducir el espacio solución del problema, pero también es importante mencionar que el precio a pagar de dicha ventaja corresponde a la necesidad de desarrollar un sistema de restricciones más complejo para atender dicha estructura. Dicha situación puede ser verificada en la modelación antes expuesta.

### **3.3 Segundo problema de la logística: programación de la producción para ambientes continuos.**

La programación de la producción es uno de los problemas más importantes a resolver en la práctica actual de la logística de los negocios. Generalmente las empresas resuelven este problema sobre la base de la experiencia de la gente encargada de realizar dichas funciones. De hecho, es raro encontrar en las empresas que el área encargada de programar la producción sea la misma área que tiene la responsabilidad de programar la distribución inter-plantas e inter-cedis.

Posiblemente la principal razón de lo anterior es debido a que ya por sí solas cada una de estas funciones son lo suficientemente complejas como para lograr integrar en un solo sistema de trabajo toda la logística de suministro. No obstante, intrínsecamente es necesaria dicha integración a fin de asegurar una coordinada y ágil operación que asegure la optimización de la cadena de suministro. En principio, la programación de la producción debe tomar en cuenta las capacidades de producción presentes de la planta. Esto se refiere, por ejemplo, a aspectos tales como <sup>30</sup>:

1. Disponibilidad de cuadrillas de operadores.
2. Consideración y apego a los programas de mantenimiento preventivo.
3. Disponibilidad de inventarios de materias primas para el proceso productivo.
4. Restricciones referidos al tamaño de los lotes prácticos de producción.
5. Tiempos requeridos y costos implicados para los cambios de producto (Setup) en las líneas de producción.

De igual modo, la operación de distribución inter-plantas o inter-cedis conlleva la consideración de aspectos tales como:

1. Capacidades de almacenamiento en cada planta y CEDIS.
2. Capacidades de servicio y atención a los fletes de entrada y de salida desde o hacia cada planta o CEDIS.
3. Políticas de cobertura de inventarios por tipo de producto y para cada planta o CEDIS.

Como puede apreciarse, el problema es complejo dado que, mantener una política generosa en los inventarios asegura el abastecimiento y la disponibilidad del producto, sin embargo, incrementa los costos

---

<sup>30</sup> Klein, Robert. (1999), *Scheduling of Resource-Constrained Projects*, Kluwer Academic, EUA, pag 77.

financieros, las mermas y los desperdicios causados por los excesos de inventarios en la operación. Por otro lado, si acaso la política de inventarios fuese muy rigurosa, entonces los costos financieros de los inventarios tenderían a bajar, pero se incrementaría la probabilidad de que lleguen a existir problemas de abasto, disponibilidad y oferta de producto en el mercado afectando potencialmente el volumen de ventas.

Encontrar el justo medio para la problemática anterior es solo el inicio, ya que luego será necesario incluir en la disyuntiva anterior, la necesidad de realizar frecuentes cambios de producto en las líneas de fabricación. Esto último ciertamente puede disminuir los costos financieros de los inventarios, pero por otro lado incrementará los costos y los tiempos improductivos que se generan cada vez que es necesario hacer un cambio en las líneas de producción, es decir se incrementan la cantidad de cambios o setups en las plantas.

Finalmente, es obvio decir que esta logística de suministro debe estar desarrollada bajo una base dinámica en el tiempo, siempre procurando apegarse a las condiciones cambiantes de la demanda del mercado al nivel de producto y territorio de venta. Para ello, el uso de un pronóstico de demanda como información entrante al modelo matemático, resultará crucial para su implementación en la práctica de los negocios.

El objetivo en esta cadena de suministro será el lograr ejecutarla siempre asegurando la disponibilidad del producto correcto, en la cantidad correcta y en el momento oportuno al menor costo posible. Así pues un posible criterio de optimización podría ser aquel basado en minimizar la suma total de los costos de producción, más los costos financieros de los inventarios, más los costos de oportunidad debido a los faltantes de producto.

A continuación se anexa el modelo matemático planteado para el problema en cuestión.

## Variables Exógenas asociadas al Inventario

$I_{ij0}$  = Inventario actual del producto "i" en la planta "j"

$W_{ijkl}$  = Inventario estimado en proceso para el producto "i" en la línea de producción "k" localizada en la planta "j" y en el turno "l"

$D_{ijl}$  = Demanda esperada para el producto "i" en la planta "j" en el turno "l"

$P_{ij}$  = Política de inventarios mínimos para el producto "i" en la planta "j"

$M_{ijl}$  = Inventario estimado de insumos para producir el producto "i" en la planta "j" en el turno "l"

$F_{ij}$  = Política de inventarios de insumos mínimos requeridos para poder producir el producto "i" en la planta "j"

## Variables Exógenas asociadas a las Capacidades de Producción

$Q_{jl}$  = Cantidad de cuadrillas disponibles para producción en la planta "j" y en el turno "l"

$R_{ik}$  = Lote práctico de producción para el producto "i" en la línea de producción "k"

*Definición de disponibilidad de líneas de producción por turno :*

$$A_{kl} = \begin{cases} 0 & \text{No estará disponible la línea de producción "k" en el turno "l"} \\ 1 & \text{Si} \end{cases}$$

*Factibilidad del uso de las líneas de producción para cada producto*

$$B_{ik} = \begin{cases} 0 & \text{No es viable producir el producto "i" en la línea de producción "k"} \\ 1 & \text{Si} \end{cases}$$

### **Variables Exógenas asociadas a las Capacidades en Almacenes**

$H_j$  = Capacidad de almacenaje para producto terminado en la planta " j "

$E_{jl}$  = Capacidad de fleteo de salida de producto inter - plantas para la planta " j " en el turno " l "

$S_{jl}$  = Capacidad de fleteo de entrada de producto inter - plantas para la planta " j " en el turno " l "

### **Variables Exógenas asociadas a los Costos de Operación**

$C_{ik}$  = Costo de producción unitario para el producto " i " en la línea de producción " k "

$G_{jh}$  = Costo de fleteo unitario para enviar producto desde la planta " j " a la planta " h "

### **Variables Endógenas**

$X_{ijk} \geq \begin{cases} 0 & \text{NO se produce el producto " i " en la línea de} \\ & \text{producción " k " de la planta " j " en el turno " l " } \\ 1 & \text{SI} \end{cases}$

$I_{ijl} \geq 0 \begin{cases} \text{Inventario final del producto " i " } \\ \text{en la planta " j " y en el turno " l " } \end{cases}$

$Y_{ijhl} \geq 0 \begin{cases} \text{Cantidad de unidades a fletear del producto " i " } \\ \text{en el turno " l " desde la planta " j " hacia la planta " h " } \end{cases}$

### Restricciones (1 de 3)

$$\sum_{j=1}^{n2} \sum_{i=1}^{n1} X_{ijkl} \leq A_{kl}$$

Para  $k=1 \dots n3$

$$l=1 \dots n4$$

Para cada línea de producción "k" y en cada turno "l", la decisión de producir un producto "i" en una planta "j" deberá considerar la disponibilidad de la línea.

$$\sum_{j=1}^{n2} \sum_{l=1}^{n4} X_{ijkl} \leq B_{ik}$$

Para  $i=1 \dots n1$

$$k=1 \dots n3$$

Para cada producto "i" y en cada línea de producción "k" la decisión de producir en un turno "l" y en una planta "j" deberá considerar su factibilidad.

$$\sum_{i=1}^{n1} \sum_{k=1}^{n3} X_{ijkl} \leq Q_{jl}$$

Para  $j=1 \dots n2$

$$l=1 \dots n4$$

Para cada planta "j" y en cada turno "l" la decisión de producir cualquier producto "i" y en cualquier línea de producción "k" deberá considerar la cantidad de cuadrillas disponibles para producción.

### Restricciones (2 de 3)

| $M_{ijl}$ |          |                |
|-----------|----------|----------------|
| L1        | LS       |                |
| 0         | $F_{ij}$ | $X_{ijkl} = 0$ |
| $F_{ij}$  | $\infty$ | $X_{ijkl} = 1$ |

$$F_{ij} * X_{ijkl} \leq M_{ijl}$$

$$F_{ijl} + \infty X_{ijkl} \geq M_{ijl}$$

Para  $i, j, k, l = 1 \dots n1, n2, n3, n4$

Para cada producto "i", en cada planta "j", en cada línea de producción "k" y en cada turno "l", se deberá de considerar la política de inventarios mínimos requeridos de insumos para poder producir.

El inventario final del producto "i" en la planta "j" y en el turno "l" será igual a: inventario final del turno anterior más el inventario actual en proceso mas la producción menos la demanda.

$$I_{ijl} = I_{ijl-1} + \sum_{k=1}^{n3} W_{ijkl} + \sum_{k=1}^{n3} R_{ik} * X_{ijkl} - D_{ijl}$$

Para  $i, j, l = 1 \dots n1, n2, n4$



### Restricciones (3 de 3)

$$\sum_{i=1}^{n1} I_{ijl} \leq H_j \quad \text{El inventario final en cada planta "j" y en cada turno "l" no deberá exceder la capacidad de almacenamiento.}$$

para  $j, l = 1..n2, n4$

$$I_{ijl} \geq P_{ij} \quad \text{El inventario final de cada producto "i" en cada planta "j" y en cada turno "l", deberá considerar la política de inventarios mínimos.}$$

para  $i, j, l = 1..n1, n2, n4$

$$\sum_{i=1}^{n1} \sum_{h=1}^{n2} Y_{ijhl} \leq S_{jl} \quad \text{Para cada planta "j" y en cada turno "l", el total de la cantidad de producto "i" a fletear hacia todas las plantas "h", deberá considerar la capacidad de fleteo de salida.}$$

para  $j, l = 1..n2, n4$

$$\sum_{i=1}^{n1} \sum_{h=1}^{n2} Y_{ihjl} \leq E_{jl} \quad \text{Para cada planta "j" y en cada turno "l", el total de la cantidad de producto "i" recibido desde todas las plantas "h", deberá considerar la capacidad de fleteo de entrada.}$$

para  $j, l = 1..n2, n4$

### Función Objetivo:

$$FO_{\min} : \sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} \sum_{k=1}^{n3} \sum_{l=1}^{n4} C_{ik} * R_{ik} * X_{ijkl} +$$

$$\sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} \sum_{h=1}^{n2} \sum_{l=1}^{n3} G_{jh} * Y_{ijhl}$$

Minimizar el total de los costos de:

- 1.- Producción.
- 2.- Fleteo.

Considerando:

- 1.- Todos los productos.
- 2.- Todas las líneas de producción.
- 3.- Todos los almacenes y
- 4.- Todos los turnos a querer ser programados.

La modelación anterior, aunque contiene una mayor cantidad de variables que el primer modelo expuesto en el apartado 3.2, no obstante resulta ser más fácil de resolver computacionalmente hablando. La principal razón para afirmar lo anterior tiene que ver con la dimensionalidad combinatoria de ambos problemas. Es decir, el presente problema tiene muchas menos combinaciones que atender que el problema revisado en el apartado 3.2.

La estructura matemática del presente problema parte de una situación actual determinada por las siguientes condiciones de operación:

1. Niveles de inventario por producto y por planta tanto para el producto terminado, para el producto en proceso y también para los insumos.
2. Pronósticos de demanda y políticas de inventario por producto y por planta.
3. Disponibilidad de capacidad en términos de las cuadrillas de obreros por planta y por turno.
4. Disponibilidad de capacidad en términos del programa de mantenimiento preventivo por máquina y por turno.
5. Matriz de flexibilidad productiva en términos de la capacidad de las máquinas para producir cuales productos.
6. Capacidades de almacenaje y flujo de transporte entrante y saliente en la planta.
7. Costos de producción, de almacenaje y de transporte.

La formulación central del modelo gira en torno a un problema de flujo de redes. Se parte de los inventarios iniciales en cada uno de los nodos de la red los cuales se ven modificados de acuerdo a los flujos eventuales que ocurran en la red. Así entonces se da origen al inventario final en cada nodo de la red el cual es confrontado versus las políticas que hayan sido definidas por el planeador.

Del párrafo anterior tenemos que los flujos propuestos en la red, a su vez resultan básicamente de las variables endógenas del problema. Las variables endógenas del modelo a su vez se concentran en dar una solución óptima al programa de producción de las plantas así como al programa de transporte de la red logística. Finalmente, la solución óptima del modelo se rige entonces por los criterios de costos mencionados en el inciso 7 del párrafo anterior.

### **3.4 Tercer problema de la logística: programación de la producción para ambientes discretos.**

En los ambientes dedicados a la manufactura o al desarrollo de servicios personalizados tipo discretos (ó también denominados Job-Shop) es siempre crítico y crucial determinar en qué orden deben ser atendidas las órdenes de producción a ser procesadas en la planta. Un criterio de secuenciación normalmente utilizado para determinar el orden de ejecución de los pedidos de producción es el de "Primeras Entradas - Primeras Salidas" (FIFO). Sin embargo, este criterio de secuenciación, no obstante su simplicidad, no necesariamente resulta siempre el mejor en virtud de que las necesidades de los clientes que compiten por los recursos productivos de la empresa no tienen las mismas prioridades y exigencias.

Un ejemplo de lo anterior sería aquel caso en el cual un cliente "X" haya fincado su orden primero que otro cliente "Y". En este caso, un criterio FIFO nunca podría tomar en consideración el hecho de que al cliente "X" lo que más le importa no es un tiempo de entrega urgente sino más bien aprovechar alguna consideración o descuento de tipo económico. En este mismo caso, podría ocurrir que el cliente "Y" esté dispuesto a pagar un precio más alto por recibir un servicio express.

Obviamente, conocer las prioridades del cliente siempre será el punto de partida para cualquier negociación que promueva el eficiente uso de los recursos de la empresa, coadyuvando de esta manera a incrementar la rentabilidad del negocio. Esto no quiere decir que no se puedan ofrecer tiempos de entrega cortos al cliente, más bien la pregunta primera es, qué tanto al cliente le interesa eso como para estar dispuesto a pagar un premio. Aquí es cuando el cliente de manera racional buscará valorar ambos aspectos en la búsqueda de un justo medio.

Indistintamente, cualquier consideración de prioridades definido por parte del cliente, sería dada a conocer al modelo de secuenciación matemático con la finalidad de tomarlo en cuenta como una más de las restricciones del sistema. Lo importante es que este tipo de restricciones o eventualidades que el cliente está dispuesto a pagar por ellas sean aprovechadas de manera efectiva por las áreas involucradas en la empresa.

Ahora bien, dejando de lado los intereses y prioridades de nuestros clientes y echando una mirada al aspecto operativo y productivo, podemos luego apreciar la dificultad que conlleva el mantener una planta siempre ocupada y de hacerlo de manera equilibrada y estable evitando con esto los picos de carga de trabajo. Esto significa el tomar en cuenta factores que van desde el cumplimiento de los programas de

mantenimiento preventivos hasta la administración de los tiempos de espera y de los inventarios en proceso (WIP) que se generan a la entrada de cada una de las estaciones de trabajo por las cuales tiene que pasar un producto o servicio durante su elaboración.

Es comprensible darse cuenta que entre mayor sea la cantidad de órdenes de producción "n" que compiten por empezar a ser elaboradas, así como también entre mayor sea la cantidad de procesos u estaciones de trabajo "m" que estén involucradas en dichas órdenes de producción, pues también crece de manera exponencial la complejidad del problema a ser resuelto. Así pues, este problema puede ser descrito en términos de su complejidad computacional como un problema del tipo "difícil de resolver" o también referidos como "NP-Hard" (del inglés Non-polinomial Hard).

La complejidad del problema se aprecia una vez que el objetivo del administrador es encontrar aquella secuencia en la cual óptimamente conviene procesar las órdenes de producción tomando en cuenta todas las restricciones presentes en el sistema. Los criterios de optimización, que a la vez pueden ser también llamadas estrategias, pueden ser tantas como las condiciones de un negocio las requiera. Aquí, por ejemplo enumeramos algunas que pudieran ser interesantes a tomar en cuenta por los administradores preocupados por resolver el problema:

1. Minimizar el total de los tiempos de retraso (horas, días, etc) del total de las órdenes de producción pendientes de ser entregadas al cliente (Backlog).
2. Minimizar el máximo tiempo de retraso de aquella orden de producción que tenga que esperar más tiempo en ser entregada.
3. Minimizar los costos financieros así como los relacionados con mermas y desperdicios ocasionados por el exceso de los inventarios en proceso (WIP).
4. Minimizar los tiempos de ocio en las estaciones de trabajo de la planta.
5. Minimizar los tiempos de espera de las ordenes de producción a la entrada de las estaciones de trabajo.
6. Maximizar la utilidad de operación.

A continuación se anexa el modelo matemático planteado para el problema en cuestión.

(M4) Secuenciación de "n" ordenes en "m" máquinas con tiempos de Setup determinísticos y tiempos de entrega negociados.

(Resource Constrained Job Shop Scheduling Problem)

### Variables de Entrada:

$A_i$  = Tiempo de Procesamiento de la Orden "i" en la Máquina "A"

$B_i$  = Tiempo de Procesamiento de la Orden "i" en la Máquina "B"

$C_i$  = Tiempo de Procesamiento de la Orden "i" en la Máquina "C"  
... y así para "m" máquinas que puedan estar involucradas

$L_i$  = Tiempo de entrega negociado con el cliente de la Orden "i"

$V_i$  = Costo de descuento para la orden "i" por cada día de retraso en su tiempo de entrega real contra el comprometido al cliente.

$U_i$  = Precio marginal acordado con el cliente de la orden "i" por cada día de adelanto a su tiempo de entrega comprometido.

donde "i" son las ordenes de producción desde  $i = 1 \dots n$

### Variables de Salida (1 de 2):

$X_{ij} \geq 0, \leq 1, \text{ent} \begin{cases} 0 \rightarrow \text{La orden "i" NO será procesada en la secuencia "j"} \\ 1 \rightarrow \text{SI} \end{cases}$

$PA_j \geq 0 \begin{cases} \text{Tiempo de proceso en la máquina "A" de la orden} \\ \text{a ser procesada en la secuencia "j"} \end{cases}$   
igual  $PB_j$  y  $PC_j$  para las Máquinas "B" y "C"

$TA_j \geq 0 \begin{cases} \text{Tiempo determinación en la máquina "A" de la orden} \\ \text{a ser procesada en la secuencia "j"} \end{cases}$   
igual  $TB_j$  y  $TC_j$  para las Máquinas "B" y "C"

$H_j \geq 0 \begin{cases} \text{Tiempo de entrega comprometido al cliente para} \\ \text{la orden procesada en la secuencia "j"} \end{cases}$

### Variables de Salida (2 de 2):

$R_j \geq 0$  { *Tiempo de retraso respecto a la fecha de entrega comprometida con el cliente de la orden a ser procesada en la secuencia " j"*

$S_j \geq 0$  { *Tiempo de adelanto respecto a la fecha de entrega comprometida con el cliente de la orden a ser procesada en la secuencia " j"*

$W_j \geq 0, \leq 1, \text{ent}$  {  $0 \rightarrow$  *La orden a ser procesada en la secuencia " j"*  
*NO tuvo retraso*  
 $1 \rightarrow$  *SI*

$Z \geq 0$  { *Máximo tiempo de retraso obtenido para las ordenes en el sistema*

$F_j \geq 0$  { *Costo de descuento diario comprometido con el cliente por incumplimiento en la fecha de entrega para la orden procesada en la secuencia " j"*

$G_j \geq 0$  { *Sobre precio marginal diario negociado con el cliente por adelanto en la fecha de entrega para la orden procesada en la secuencia " j"*

### Restricciones (1 de 2):

*Restricciones para normalización de las variables imputables a :*

a) *Tiempos de proceso para la orden " i" en cada máquina (A, B y C)*

b) *Tiempo de entrega comprometido con el cliente para cada orden " i"*

c) *Descuentos y Precios marginales negociados con el cliente por retraso - adelanto*

$$PA_j = \sum_{i=1}^n X_{ij} * A_i \quad PB_j = \sum_{i=1}^n X_{ij} * B_i \quad PC_j = \sum_{i=1}^n X_{ij} * C_i \quad H_j = \sum_{i=1}^n X_{ij} * L_i$$

$$F_j = \sum_{i=1}^n X_{ij} * V_i \quad G_j = \sum_{i=1}^n X_{ij} * U_i$$

*Cálculo del tiempo de terminación de la orden " j" en la máquina " A" ; para j = 1 ... m*  $\therefore TA_j = TA_{j-1} + PA_j$

*Cálculo del tiempo de ocio y del tiempo de espera para la orden " j" en la entrada de la máquina " B" y " C" ; para j = 1 ... m*

$$TA_j - TB_{j-1} = OB_j - EB_j$$

$$TB_j - TC_{j-1} = OC_j - EC_j$$

### Restricciones (2 de 2):

Cálculo del tiempo de terminación para cada orden "j" en las máquinas "B" y "C"; para  $j = 1 \dots m$

$$TB_j = TA_j + EB_j + PB_j \quad TC_j = TB_j + EC_j + PC_j$$

Cálculo del tiempo de retraso-adelanto en el sistema; para  $j = 1 \dots m$

$$TC_j - H_j = R_j - S_j$$

Cálculo del máximo retraso en el sistema; para  $j = 1 \dots m \quad \therefore Z \geq R_j$

Cálculo de la cantidad de tareas con retraso en el sistema; para  $j = 1 \dots m$

|      |          |           |                       |  |
|------|----------|-----------|-----------------------|--|
|      | $R_j$    |           |                       |  |
| $LI$ |          | $LS$      |                       |  |
| 0    | 0        | $W_j = 0$ | $W_j \leq R_j$        |  |
| 1    | $\infty$ | $W_j = 1$ | $\infty W_j \geq R_j$ |  |

### Funciones Objetivo:

$$FO_{min} : \sum_{j=1}^m W_j \quad \left\{ \text{Minimizar la cantidad de ordenes con retraso} \right\}$$

$$FO_{min} : \sum_{j=1}^m R_j \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Minimizar la cantidad de dias totales} \\ \text{con retraso en el sistema} \end{array} \right\}$$

$$FO_{min} : Z \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Minimizar el máximo retraso de alguna} \\ \text{orden en el sistema} \end{array} \right\}$$

$$FO_{min} : TC_n \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Minimizar el tiempo de ocio en el sistema; osea minimizar} \\ \text{el tiempo de terminación de la última orden en el sistema} \end{array} \right\}$$

$$FO_{min} : \sum_{j=1}^m (R_j + S_j) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Minimizar la cantidad de dias de retraso y} \\ \text{adelanto en el sistema, "Just-in-Time"} \end{array} \right\}$$

$$FO_{max} : \sum_{j=1}^m (S_j * G_j - R_j * F_j) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Maximizar la ganancia global :} \\ \text{pedidos con adelanto versus} \\ \text{pedidos con retraso} \end{array} \right\}$$

Recordemos que el primero modelo presentado en el apartado 3.2 correspondió a la clasificación de problemas de “empacamiento” (o Packing en inglés). El segundo en el apartado 3.3 correspondió a uno de “flujo de redes” (o Network Flow en inglés). El presente modelo expuesto en el apartado 3.4 corresponde a la clasificación de problemas del tipo de “secuenciamiento” (o Scheduling en inglés). En general, los problemas de secuenciamiento así como los de empacamiento son problemas NP-Hard (en el capítulo 5 se tratará este tema).

Básicamente la estructura matemática del problema gira en torno al conjunto de variables que identifican la cantidad de tiempo de preparación (o setup time en inglés), así como del tiempo productivo requerido para procesar cada orden en cada una de las máquinas por donde deba ser procesada. Adicionalmente el modelo incorpora una variable de tiempo y otras dos variables económicas para definir la importancia relativa que el planeador está tomando en cuenta para decidir en que momento conviene entregar la orden al cliente.

El esfuerzo del modelo matemático se enfoca en el cálculo del tiempo de finalización de cada orden. Naturalmente dicho tiempo ocurre una vez que concluye su proceso en la última máquina por donde debe pasar. Por tal motivo, es razonable observar que en la modelación se desarrolla un conjunto de restricciones con la finalidad de dar consistencia al momento en el que cada orden entra a procesarse en cada máquina. Dicho momento depende lógicamente del momento en que cada orden haya finalizado su procesamiento en la máquina anterior así como del tiempo en el cual haya finalizado su procesamiento la orden que aparece en una secuencia adelante en la máquina a la cual se requiere entrar. Con lo anterior, es entonces posible determinar la estrategia óptima en la cual conviene que cada orden se procese en las máquinas productivas. Lo anterior consecuentemente determina el tiempo de terminación de cada orden y por ende un tiempo de retraso o de adelanto con respecto a la fecha de entrega comprometida al cliente.

Aunque el problema de secuenciamiento tratado en el presente apartado está enfocado a dar tratamiento a problemas relacionados en el ámbito de la manufactura, no obstante posee ciertas similitudes matemáticas respecto al cuarto problema general de la logística que será expuesto en el siguiente apartado 3.5 el cual se concentra, a diferencia del anterior, en problemas de ruteo de distribución. La razón de la similitud anterior obedece al hecho de que ambos problemas caen matemáticamente dentro de la categoría de problemas de “secuenciamiento”. No obstante lo anterior, a los problemas de “secuenciamiento” cuya aplicación es en ruteo de distribución se les categoriza simplemente como problemas de ruteo (o Routing en inglés).



### **3.5 Cuarto problema de la logística: programación de la distribución (Ruteo).**

Uno de los problemas más difíciles a resolver en la teoría matemática contemporánea corresponde a determinar aquella secuencia óptima en la cual llevar a cabo un programa de eventos o actividades en los cuales no existe una precedencia determinada. El objetivo en la operación logística de distribución es la obtención de un programa o secuenciación de entrega que asegure hacer llegar el producto en la cantidad adecuada, en el momento acordado con el cliente y de la manera menos costosa posible.

El objetivo de una programación óptima de la distribución no es otra cosa que "operar" de la manera más eficiente posible la distribución física; apoyándose en el plan estratégico de distribución logístico ya antes cubierto. En términos específicos, nos referimos a obtener el recorrido y la secuencia óptima de los clientes a ser visitados a través de la configuración de una ruta de distribución. A este problema en su variante más básica se le conoce como el "Problema del Agente Viajero" o "TSP" (Traveling Salesman Problem).

No obstante, podemos generalizar este fenómeno hacia una configuración en la cual se tengan que determinar no solamente la secuenciación de los clientes a ser atendidos por una ruta, sino también la asignación de cada uno de los clientes a cada una de las diversas rutas o medios de distribución que se tengan disponibles de tal manera que también sea necesario optimizar la cantidad de vehículos a ser utilizados. A este último problema que resulta aún más general se le denomina "Problema de Ruteo de Vehículos" o "VRP" (Vehicle Routing Problem).

Así pues, un Programa de Distribución óptimo debería tomar en consideración:

1. Ubicación geográfica de los clientes.
2. Restricciones de orientación de calles.
3. Normas y regulación de vialidad y tránsito (horarios de circulación, límites de velocidad, vueltas a la derecha o a la izquierda o en "u", etc).
4. Restricciones de horario que puedan haber por parte del cliente para su atención.
5. Usos y costumbres de entrega de acuerdo a las barreras topográficas que pudieran presentarse.
6. Consideraciones de "paradas únicas" para entrega o recolección de producto correspondiente a clientes múltiples, modalidad para entrega en centros comerciales, etc.

Así pues, habiendo tomado en cuenta todas las consideraciones antes mencionadas, podemos definir conceptualmente el problema, como aquél en el cual se busca encontrar aquella secuencia o recorrido en el cual visitar a los clientes a ser atendidos por una ruta o varias rutas a la vez de tal manera que se optimicen cualquiera de los siguientes criterios que el administrador decida convenientemente aplicar en caso particular:

1. Minimizar las distancias recorridas.
2. Minimizar los costos incurridos.
3. Minimizar los tiempos de retraso.
4. Minimizar # de vehículos requeridos.

No obstante estos criterios de optimización pudieran parecer entre ellos mismos relaciones lineales, cada uno de ellos debiera tratarse por separado de acuerdo a las necesidades y criterios que el administrador mejor considere. El modelo matemático para este problema será presentado en extenso en el capítulo 6 ya que éste es precisamente el problema de investigación del proyecto doctoral.

Concluida la exposición tanto conceptual como del modelo matemático para los cuatro problemas generales en la logística, pasaremos en el siguiente apartado 3.6 a revisar cuál es la relación que guardan los sistemas ERP y APS con respecto al OR/MS en lo general y con respecto a la contribución que este tipo de sistemas han brindado para solucionar los problemas generales de la logística en lo particular. Derivado de la exposición teórica bibliográfica que se hará en el siguiente apartado, se procederá a continuación en el apartado 3.7 a realizar un análisis comparativo específico a la funcionalidad que las diversas ofertas de este tipo de sistemas comercialmente ofrecen para solucionar nuestro problema de investigación (problemas de ruteo de distribución).

Finalmente cerramos el capítulo con el apartado 3.8 en el cual se expone un estudio de caso. Dicho estudio de caso tiene el objetivo de determinar la incidencia actual de las empresas grandes y medianas del área metropolitana de la ciudad de Monterrey en cuanto a las metodologías que éstas aplican para resolver los problemas relacionados en el ámbito logístico en general. Mediante dicho estudio de caso, pretendemos contrastar los resultados obtenidos respecto a la teoría expuesta en el apartado 3.6.

### 3.6 La relación de los sistemas MRP, ERP y APS con el OR/MS.

A fin de lograr una mejor comprensión del tema, invitamos al lector a revisar el significado de las siglas MRP, ERP y APS en el glosario de la tesis. Un problema que enfrenta la profesión del OR/MS es el acceso a la información relevante. Esto es crucial, sobre todo tomando en cuenta que una de las cualidades del OR/MS es la de generar valor a partir de la información. En los sistemas de información de las empresas, los datos son guardados obedeciendo a políticas de acceso y temporalidad. En otros casos se observa tan solo, que estos datos son mantenidos de manera informal, irregular o de manera inconsistente.

La dificultad de los proyectos de OR/MS y en general de la mayor parte de aquellos que buscan resolver un problema, tiene que ver con la dificultad humana para distinguir, ordenar y hacer uso de la información que es relevante. Lo anterior toma relevancia asumiendo que la información relevante proviene de un océano de datos donde también está mezclada con otros datos que no son relevantes. No es aventurado asegurar que los proyectos de OR/MS evidencien la falta de calidad y de relevancia de los datos que puedan estarse almacenando en los sistemas de información de las empresas. Los Sistemas ERP han contribuido a la disponibilidad de información en las organizaciones. Sin embargo, no existe la misma facilidad para hacer uso de éstos en la toma de decisiones de la logística. Ambos requerimientos (uno cubierto y el otro no) son complementarios. En la Figura 3.2 se evidencia la relación entre ambos.

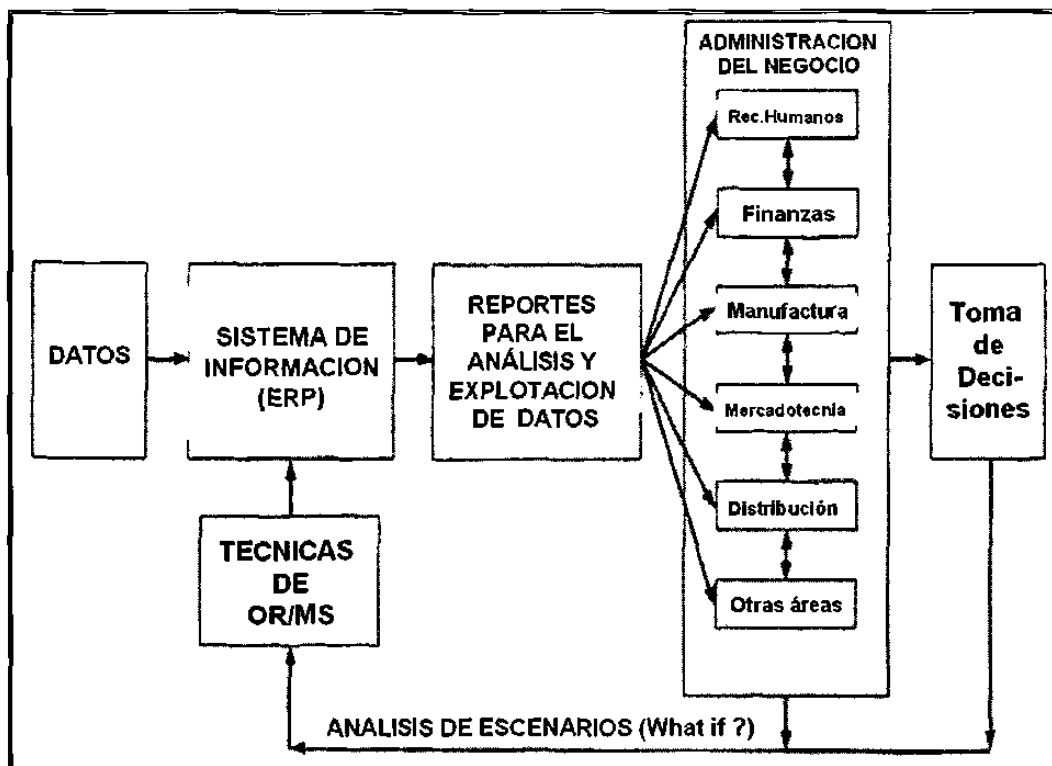


Figura 3.2 Relación de los sistemas ERP con el OR/MS en el proceso de toma de decisiones.

De los problemas generales de la logística presentados anteriormente, verificamos que tres de ellos tienen algo en común. Es decir, (1) programación de la producción para ambientes continuos, (2) programación de la producción para ambientes discretos y (3) programación de la distribución o ruteo; poseen un componente común llamado "secuenciación". La programación o secuenciación (en inglés Scheduling), consiste en encontrar la mejor secuencia de tiempo de inicio para cada actividad involucrada en el proceso en cuestión, de tal manera que logre el menor costo de operación para el sistema y al mismo tiempo la mejor oferta de servicio al cliente.<sup>31</sup>

El Scheduling involucra ordenar los eventos dependientes unos de otros y en secuencia; considerando la demanda, tiempos de entrega, inventarios y restricciones de capacidad que son utilizados para determinar la mejor asignación de recursos y la mejor secuenciación de actividades para lograr un equilibrio entre los costos de la logística y el nivel de servicio al cliente. Otra forma de definir el significado de "Scheduling" es en términos de las soluciones que ofrece. Así pues podemos entonces decir que "Scheduling" consiste en definir:

1. ¿Qué debo producir o distribuir?
2. ¿Cuándo debo hacerlo?
3. ¿En qué cantidad debo hacerlo (Cuanto)?
4. ¿Desde dónde debo hacerlo?
5. ¿Hacia dónde debo hacerlo?
6. ¿Cómo debo hacerlo (en qué secuencia)?
7. ¿Qué recursos requiero para hacerlo (con qué)?

Las interrogantes anteriores se deben resolver sujetas a restricciones de demanda, capacidades de recursos (máquinas, gente, dinero, etc), tiempos de entrega, inventarios, etc. y buscando a la vez alcanzar objetivos tales como:

1. Maximizar la rentabilidad de la empresa.
2. Minimizar el tiempo de entrega al cliente Maximizar el nivel de servicio
3. Minimizar los tiempos de ocio Minimizar los tiempos de espera.

---

<sup>31</sup> Hartmann, Sonke. (2000), *Project Scheduling Under Limited Resources: Models, Methods, and Applications*, Springer Verlag, EUA, pag 35-60.

La programación o secuenciación es un problema comúnmente enfrentado en las empresas de manufactura y de servicios que habitualmente se administra de manera manual y sobre la base de la experiencia de los administradores. El programador es el responsable de minimizar las ineficiencias (costos) en el sistema y de maximizar el nivel de servicio al cliente. Encontrar la solución óptima a los problemas de "Scheduling" representa un desafío en el ámbito de las teorías matemáticas contemporáneas, en el siguiente capítulo 4 será tratado este tema de manera formal.

Más del 20% de las grandes empresas en el mundo han gastado miles de millones de dólares en resolver sus problemas de logística. Ello ha evolucionado gradualmente iniciando desde los 70's con los Sistemas MRP hasta llegar a los 90's con las versiones de sistemas ERP. En la actualidad, los proveedores de sistemas ERP ya aceptaron que sus supuestas soluciones ofrecidas en el pasado no resuelven este tipo de problemas referentes a la logística. Dado que los sistemas MRP y ERP no poseen la inteligencia necesaria, las corporaciones han tenido que resolver con desarrollos propios el problema <sup>32</sup>.

El Phd. Thomas Hsiang, director en la Corporación Sensient Technologies con más de 40 plantas alrededor de 20 países en el mundo con sede en Milwaukee. Junto con Hsiang, tenemos a John Liu y D. Q. Yao ambos son profesores de "Management Science" de la Escuela de Negocios en la Universidad de Wisconsin en Milwaukee. Ellos tres, en su publicación "La Ilusión del Poder" detallan sus puntos de vista respecto a investigaciones que han hecho con empresas en los Estados Unidos en donde han tenido que resolver problemas relacionados a la Logística en general, a continuación cito (traducción libre):

*"No importa qué tanto los proveedores de sistemas MRP y ERP digan que sus sistemas pueden optimizar la producción y los inventarios; sin importar que sus vendedores argumenten las capacidades de sus sistemas de información— duden de ellos!. No he encontrado un solo sistema que verdaderamente optimice. Todos los sistemas actualmente en el mercado son básicamente simplistas hasta el punto de caer en la ingenuidad. La experiencia obtenida en mis años de consultoría me hacen concluir lo siguiente:*

- 4. Los profesionales del OR/MS pueden contribuir grandemente a mitigar la falta de funcionalidad inherentemente encontrada en los actuales sistemas MRP/ERP*
- 5. Mientras tanto las propuestas de solución arrojados por los sistemas MRP/ERP deben ser revisadas con mucha reserva."*

---

<sup>32</sup> Hsiang, Thomas. (2001), *The Illusion of Power*, "ORMS Today", EUA, pag 5.

Los proveedores de sistemas ERP de los 90's, son los mismos que ahora están ofreciendo la promesa de sus sistemas APS (Advanced Planning Scheduling) como remedio final a los problemas de planeación y secuenciación de la logística. Sin sistemas de planeación y de secuenciación, aún los mejores sistemas de operación ofrecerán soluciones que costarán más de lo necesario y sin alcanzar los niveles de servicios deseados por el cliente. Esta fue la triste experiencia de las empresas que implementaron sistemas ERP y APS los cuales, aunque buscaban planes y programas óptimos, lo que la mayor parte de los "software" disponibles ofrecieron fueron soluciones que quizás eran aprovechables pero bastante lejos de lo óptimo.<sup>33</sup>

Aunque por un lado los sistemas ERP ofrecieron una mejora en la cantidad y en la calidad de los datos que el OR/MS requería, por el otro lado, algunas compañías decidieron dejar en desuso los modelos de OR/MS ya antes desarrollados con la errónea creencia de que estos sistemas ERP podrían sustituir todas las decisiones de planeación y secuenciación requeridas en la función logística. Pero los profesionales del OR/MS dejaron que lo anterior ocurriera y entonces los proveedores de sistemas APS empezaron a inundar el mercado con software y heurísticas simplistas para atender las necesidades logísticas de las empresas.<sup>34</sup> Entre estos proveedores tenemos incluidos a Aspen Tech, I2 Technologies, Manugistics, Numetrix y PeopleSoft. Ellos convencieron a los proveedores de sistemas ERP a reconocer la necesidad de ahora sí ya cubrir la funcionalidad requerida en la planeación y secuenciación logística que viniera a complementar sus sistemas.

Se pudiera argumentar que al final, las herramientas del OR/MS están ya embebidas en los sistemas APS, sin embargo, el problema no es ese. Mientras las empresas no asocien el uso de estos sistemas con las "competencias" requeridas por el OR/MS, habrá un pobre aprovechamiento de las inversiones que se vienen haciendo en estos sistemas. Como veremos a continuación en el estudio de campo, se verificará que en la generalidad de las empresas de la ciudad de Monterrey que han implementado algún tipo de sistema APS; aún no se han alcanzado los resultados esperados. Estas "competencias" antes mencionadas en el profesional del OR/MS, ya sean aplicadas a través de un sistema APS o a través del desarrollo de un modelo propio, propician que nuestro proyecto de investigación doctoral se enfoque en ofrecer una solución especializada para un problema particular de ruteo de distribución, el cual se expondrá con todas sus propiedades en el capítulo 6. Así entonces a través del razonamiento anterior, podemos decir que se origina nuestro proyecto de investigación de tesis.

---

<sup>33</sup> Geoffrion, Arthur. (2000), *The value of operations research*, "ORMS Today", EUA, pag 2.

<sup>34</sup> Sodhi, ManMohan. (2001), *A Match Made in Heaven*, "ORMS Today", EUA, pag 1.

### **3.7 Identificación y análisis comparativo respecto a las alternativas de software comercial tipo APS disponibles en el mercado para el tratamiento de problemas de distribución de ruteo.**

La elaboración del presente análisis se desarrolló durante el mes de Febrero del 2003 sobre la base de información del dominio público propiedad de cada una de estas empresas de software vía folletos comerciales e intensivamente a través de recopilación de información disponible vía electrónica en internet. El presente análisis comparativo se desarrolla con la finalidad de atender 5 objetivos primordiales:

1. *Identificar cual es la oferta de software comercial APS actualmente disponible en el mercado.*
2. *Determinar que tanto arraigo (antiguo) tiene el software en el mercado.*
3. *Diferenciar los elementos de capacidad de cada una de éstas ofertas.*
4. *Identificar el tipo de industria hacia el cual preponderantemente está orientado el software.*
5. *Medir la cantidad de empresas que actualmente lo utilizan.*

En la primera página aparecen las Tablas 3.1 (a) y (b). Ambas tablas muestran la misma información por renglón, simplemente lo que complementa una a la otra son las empresas que aparecen en cada una de las columnas. Como puede apreciarse, estas tablas buscan atender los primeros 3 objetivos que planteamos al inicio de este apartado.

En la segunda página aparecen las Tablas 3.2 (a) y (b). Aquí aplica el mismo comentario hecho en el párrafo anterior. Es decir estamos hablando de tablas complementarias. Como se va a poder más adelante constatar, estas tablas buscan atender los últimos dos objetivos planteados al inicio del apartado.

Tablas 3.1 (a) y (b) Comparativa de software para optimización para aplicaciones de ruteo.

| SOFTWARE                      |   | 1                         | 2          | 3                     | 4                            | 5                             | 6                   | 7                   |
|-------------------------------|---|---------------------------|------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| PROVEEDOR                     |   | Appian Logistics Software | ILOG       | Intertour / Interload | Manugistics Fleet Management | Prologos Planung und Beratung | UPS Logistics Group | UPS Logistics Group |
| AÑO DE INTRODUCCIÓN           |   | 1996                      | 1997       | 1983                  | 1985                         | 1994                          | 1983                | 1983                |
| DIMENSION MAXIMA DEL PROBLEMA | # DE NODOS  | 16,000                    | Sin Límite | 850/8,000             | Sin Límite                   | 4,000                         | Sin Límite          | Sin Límite          |
|                               | # DE RECURSOS   | 1,000                     | Sin Límite | 500/8,000             | Sin Límite                   | 1,000                         | Sin Límite          | Sin Límite          |
| ALGORITMO GENERAL DE SOLUCION | Secuenciador de Ruteo   | Y                         | Y          | Y                     | Y                            | Y                             | Y                   | Y                   |
|                               | Asignación de Nodos por Ruta  | Y                         | Y          | Y                     | Y                            | Y                             | Y                   | Y                   |
|                               | Modelación basada en Distancias Geodésicas                                | Y                         | Y          | Y                     | Y                            | Y                             | Y                   | Y                   |
|                               | Ruteo de tráfico en Tiempo Real   | -                         | -          | Y                     | Y                            | -                             | -                   | -                   |
|                               | Modelación Dinámica de Atributos Relacionados al Arco (Flujo y Velocidad) | -                         | -          | Y                     | Y                            | Y                             | Y                   | Y                   |
|                               | Modelación de Atributos estocásticos (Demandas y Tiempos)                 | Y                         | -          | Y                     | Y                            | Y                             | Y                   | Y                   |
|                               | Ventana de Horario Flexible (Con Penalización)                            | Y                         | Y          | Y                     | Y                            | Y                             | Y                   | Y                   |
|                               | Ventana de Horario Rígida   | -                         | Y          | Y                     | Y                            | Y                             | -                   | -                   |
|                               | Asignación de Recursos para Ruteo (Vehículos, Operadores)                 | Y                         | Y          | Y                     | Y                            | -                             | Y                   | Y                   |
|                               | Modelación de Atributos de Validad y Tránsito                             | Y                         | -          | Y                     | Y                            | Y                             | Y                   | Y                   |
|                               | Modelación de Restricciones y Capacidades de Carga y Descarga             | Y                         | -          | Y                     | Y                            | -                             | -                   | -                   |

| SOFTWARE                      |   | 8                       | 9              | 10                            | 11         | 12            | 13         | 14                           | 15                    |
|-------------------------------|---|-------------------------|----------------|-------------------------------|------------|---------------|------------|------------------------------|-----------------------|
| PROVEEDOR                     |   | Descartes Systems Group | CAPS Logistics | RouteSmart Technologies, Inc. | ORTEC      | SAITECH, Inc. | GeoComtms  | Trapeze Software Group, Inc. | Micro Analytics, Inc. |
| AÑO DE INTRODUCCIÓN           |   | 1987                    | 1997           | 1989                          | 1981       | 1995          | 2000       | 1992                         | 1984                  |
| DIMENSION MAXIMA DEL PROBLEMA | # DE NODOS  | 32,000+                 | -              | Sin Límite                    | Sin Límite | 100           | Sin Límite | Sin Límite                   | Sin Límite            |
|                               | # DE RECURSOS   | Sin Límite              | -              | Sin Límite                    | Sin Límite | 1,000         | Sin Límite | Sin Límite                   | Sin Límite            |
| ALGORITMO GENERAL DE SOLUCION | Secuenciador de Ruteo   | Y                       | Y              | Y                             | Y          | Y             | Y          | Y                            | Y                     |
|                               | Asignación de Nodos por Ruta  | Y                       | Y              | Y                             | Y          | Y             | Y          | -                            | Y                     |
|                               | Modelación basada en Distancias Geodésicas                                | Y                       | Y              | Y                             | Y          | Y             | Y          | Y                            | Y                     |
|                               | Ruteo de tráfico en Tiempo Real   | Y                       | -              | -                             | -          | -             | Y          | Y                            | -                     |
|                               | Modelación Dinámica de Atributos Relacionados al Arco (Flujo y Velocidad) | Y                       | Y              | Y                             | Y          | Y             | Y          | Y                            | -                     |
|                               | Modelación de Atributos estocásticos (Demandas y Tiempos)                 | Y                       | Y              | Y                             | Y          | -             | -          | Y                            | Y                     |
|                               | Ventana de Horario Flexible (Con Penalización)                            | Y                       | Y              | Y                             | Y          | Y             | Y          | Y                            | Y                     |
|                               | Ventana de Horario Rígida   | Y                       | Y              | -                             | Y          | Y             | Y          | Y                            | -                     |
|                               | Asignación de Recursos para Ruteo (Vehículos, Operadores)                 | Y                       | Y              | -                             | Y          | Y             | Y          | Y                            | Y                     |
|                               | Modelación de Atributos de Validad y Tránsito                             | Y                       | Y              | -                             | Y          | Y             | Y          | Y                            | Y                     |
|                               | Modelación de Restricciones y Capacidades de Carga y Descarga             | Y                       | -              | -                             | Y          | Y             | Y          | -                            | Y                     |



Tablas 3.2 (a) y (b) Comparativa de software de optimización para aplicaciones de ruteo (2da Parte).

| SOFTWARE  |                                     | 1   | 2  | 3   | 4   | 5                                      | 6  | 7                                      |
|---|-------------------------------------|---|--|---|---|--|--|--|
|   |                                     | Direct Route                                      | ILOG Dispatcher  | Intertour / Interload   | Manugistics Fleet Management  | Protour                                | RoadNet 5000   | Territory Planner                      |
| TIPO DE CLIENTES ACTUALMENTE UTILIZAN EL SOFTWARE | Transporte de Carga Pesada          | Y   | Y  | Y   | Y   | Y                                      | Y  | Y                                      |
|   | Entrega y Recolección en Ruta Local | Y   | Y  | Y   | Y   | Y                                      | Y  | Y                                      |
|   | Paquetería y Mensajería             | Y   | Y  | Y   | -   | Y                                      | -  | -                                      |
|   | Transporte de Pasajeros             | -   | Y  | Y   | -   | -                                      | -  | -                                      |
|   | Taxis                               | -   | Y  | Y   | -   | -                                      | -  | -                                      |
|   | Servicio de Entrega a Domicilio     | Y   | Y  | Y   | -   | Y                                      | -  | -                                      |
| CARACTERÍSTICAS Y COMENTARIOS                     |                                     | Algoritmo para Secuenciamiento Optimo de Recursos | Algoritmos para Optimización de Recolección y Entrega así como de Cubicación de Carga. | Optimización de Carga y Planeación de Transporte Multimodal                               | Algoritmos de Ruteo con restricciones de Tránsito y Vialidad. Manejo de Entregas Múltiples en cada Nodo.              | Optimización y Balanceo de Territorios | Algoritmos de Ruteo con restricciones de Tránsito y Vialidad. Manejo de Entregas Múltiples en cada Nodo. | Optimización y Balanceo de Territorios |
| # DE EMPRESAS UTILIZANDO EL SOFTWARE              |                                     | 175   | 300+   | 500   | 1000+   | 20                                     | 1000+  | 1000+                                  |
| PRINCIPALES CLIENTES                              |                                     | Walgreens, Schelder, Nabisco                      | -  | Swiss Post, Unilever, Daimler Chrysler, Volkswagen, BMW, Rockwool, Auchan, Feldschloessen | Advance Auto, Ahold, Albertsons, Baxter Healthcare, Fleming, Kroger, Nash Finch, Perseco, Winn Dixie, Safeway, McLane | Servicio de Paquetería en Alemania     | Pepsi, Sysco, U.S. Foods   | Pepsi, Sysco, Anheuser-Busch           |

| SOFTWARE  |                                     | 8  | 9  | 10  | 11  | 12   | 13  | 14   | 15   |
|---|-------------------------------------|--|--|---|---|--|---|--|--|
|   |                                     | Roadshow System  | RoutePro   | Route Smart   | SHORTREC product suite                                    | STARS (Smart Truck Assignment and Routing System)  | tmsRouter   | Trapeze  | TruckSTOPS Routing & Scheduling for Windows  |
| TIPO DE CLIENTES ACTUALMENTE UTILIZAN EL SOFTWARE | Transporte de Carga Pesada          | Y  | Y  | -   | Y   | Y  | Y   | -  | Y  |
|   | Entrega y Recolección en Ruta Local | Y  | Y  | Y   | Y   | Y  | Y   | -  | Y  |
|   | Paquetería y Mensajería             | Y  | -  | -   | Y   | Y  | Y   | -  | Y  |
|   | Transporte de Pasajeros             | -  | -  | -   | Y   | -  | -   | Y  | -  |
|   | Taxis                               | -  | -  | -   | Y   | -  | -   | -  | -  |
|   | Servicio de Entrega a Domicilio     | Y  | -  | Y   | Y   | Y  | Y   | -  | Y  |
| CARACTERÍSTICAS Y COMENTARIOS                     |                                     | Planeación de Ruteo y Algoritmos de Despacho Dinámico.       | Optimización y Balanceo de Territorios                                   | Orientado al ámbito Postal, Recolección de Basura y Entrega de Periódico. | Optimización y Balanceo de Territorios                    | Algoritmos para Secuenciamiento y Asignación de Cargas de Fleteo entre Almacenes Múltiples | Basado en Algoritmos Genéticos.   | Secuenciamiento para Ruteo Fijo.                 | Algoritmos para estrategias de Entrega y Recolección con restricciones de Capacidad de Carga y con Salidas Múltiples |
| # DE EMPRESAS UTILIZANDO EL SOFTWARE              |                                     | 1500   | 1000+  | 100+  | 100+  | 20   | NO DISPONIBLE   | 800  | 2400   |
| PRINCIPALES CLIENTES                              |                                     | Coca-Cola, Ambev, FedEx, Air Ground Freight Service Division | Daimler Chrysler, Ford Motor, Excel Logistics, GA-Pacific, Fresh Express | FedEx home Delivery, USPS, New York Times, Coned, 50+ municipalities      | BP, Texaco, TNT Logistics, Lafarge, Yellow Freight System | Compañía Petrolera Nisseki-Mitsubishi Oil (Japón)  | Carroll Independent Fuel, Southern Maryland Oil, Purolator, Multi-Marques | Depto de las Ciudades de Dallas, Austin y Tucson | Home Depot, Simmons Mattress, UPS Worldwide, 7-Eleven, Dominoes, Nestle, Pepsi, Miller Brewing, Chicago Tribune      |

Después de haber revisado la información comparativa del software comercial disponible, lo que se desarrollo a continuación fue una investigación más específica respecto a cuáles de estos productos tienen una presencia relevante en las empresas en México. Lo anterior simplemente se hizo sobre la base de la consulta de la cartera de clientes de estas compañías que se identificaron como las de mayor presencia en México. A continuación en la siguiente hoja, aparecen las Tablas 3.3 (a) y (b) en las cuales se adiciona información comparativa sobre la base de las limitantes técnicas de cada uno de estos software's que fueron identificadas por el postulante en función a los requerimientos que se buscan solucionar en los problemas generales de la logística de ruteo.

Es importante precisar que con el presente análisis nunca se buscó concluir con algún juicio de valoración o recomendación respecto a cual de estas ofertas de software resultara mejor. En resumen, el provecho que se obtiene de este análisis comparativo, es el de identificar las diferencias funcionales que tienen cada uno de estas ofertas de software y así evidenciar lo improbable que resulta el que una sola alternativa de software APS "genérico" logre incluir todos los aspectos particulares que requieren ser considerados para los diversos problemas de logística.

Así entonces se fundamenta la necesidad de generar una propuesta de solución especializada para nuestro problema particular de ruteo de distribución el cual se planteará de manera formal en el capítulo 6. De nuevo, es precisamente la necesidad de desarrollar una propuesta de solución especializada lo que sustenta el proyecto de investigación.

Tablas 3.3 (a) y (b) Comparativa del software para planificación de rutas.

| Nombre del Sistema APS   | Road Show   | Route Pro   | Road Net  | Solución Ideal                                   |
|--|---|---|---|--|
| Nombre del Proveedor   | Descartes   | Caps Logistics  | UPS Logistics   |  |
| Oficinas Corporativas  | Atlanta Georgia                                       | Atlanta Georgia   | Baltimore Maryland  |  |
| Costo x Licencia   | \$ 60 mil US Dlls + Consultoría                       | \$ 50 mil US Dlls Condicionado a 2 licencias mínimo                               | \$ 35 mil US Dlls y condicionado a \$30 mil US dlls en gastos de Consultoría  |  |
| # de Sesiones celebradas por Requerimiento de evaluación para Coca Cola Procor | 2   | 4   | 4   |  |
| Personal Involucrado de la Compañía  | Solo Gerentes de Ventas                               | Gerentes de Ventas y Gerentes de Sistemas   | Gerentes de Ventas y Gerentes de Sistemas                                     |  |
| Fechas de Evaluación   | Primeras 2 semanas de Marzo                           | Ultimas 2 semanas de Abril y primeras 2 de Mayo                                   | Ultimas 2 semanas de Marzo y primeras 2 de Abril                              |  |
| Lugares de Evaluación  | Saltito, México y Monterrey                           | México y Monterrey  | Culiacan, Chihuahua y Monterrey   |  |
| Implementaciones en México   | Coca Cola Panama, Coca Cola Arma                      | Sabritas, Maseca, Gamesa, Coca Cola Femsa, Pepsi Gemex                            | Coca Cola Argos   |  |
| Nivel de Servicio y Soporte Técnico  | Muy limitado y solo desde las oficinas en Atlanta USA | Aceptable y con oficinas solo en la Cd. De México, Joint Venture con GEDAS y BAAN | Oficina de Ventas en Monterrey, pero soporte técnico solo desde Baltimore USA |  |
| Asignación de Territorios a Cedis  | NO  | Optimización: basada en cargas de trabajo   | Heurístico: basado en Centros de Gravedad Geográficos                         | Optimización: basada en criterios Multiobjetivos |
| Efectividad Matemática de la Solución  | NO  | SI  | SI  |  |

| Nombre del Sistema APS  | Road Show  | Route Pro   | Road Net   | Solución Ideal   |
|---|--|---|--|--|
| Efectividad Práctica de la Solución                             | NO Maneja restricciones de Asignación o Des-asignación Dura                  | NO Maneja restricciones de Asignación o Des-asignación Dura                             | NO Maneja restricciones de Asignación o Des-asignación Dura  | Se requiere capacidad para la inclusión de consideraciones de aspecto práctico |
| Balaceo de Cargas de Trabajo entre los Territorios              | Heurístico: basado en el método de residuos                                  | Heurístico: basado en el método de residuos   | Heurístico: basado en el método de asignación secuencial   | Optimización: basada en criterios Multiobjetivos                               |
| Cantidad de Objetivos o Criterios de Balanceo                   | Limitado a 3 de Tipo Secuencial Heurístico                                   | Limitado a 3 propietarios, 30 definidos por el usuario de Tipo Paralelo pero Heurístico | Limitado a 3 propietarios, 10 definidos por el usuario pero todos de tipo Secuencial Heurístico                  | Multiobjetivo Paralelo basado en Optimización Matemática                       |
| Efectividad Matemática del Balanceo                             | NO   | NO  | SI   |  |
| Manejo de Restricciones Topográficas                            | NO   | Utiliza Restricciones Suaves  | Utiliza Restricciones Suaves   | Manejo de Restricciones Duras  |
| Manejo de Restricciones Duras de Agrupamiento o NO Agrupamiento | NO   | NO  | NO   | Se requiere para la inclusión de restricciones de índole práctico              |
| Manejo de Restricciones de Vialidad                             | Velocidades y Sentidos   | Velocidades y Sentidos  | Velocidades y Sentidos   | Velocidades y Sentidos   |
| Método de Clusterización y delimitación Geográfica              | Arreglos de Polígonos Irregulares  | Agrupamiento Irregular de Manzanas  | Arreglos de Polígonos Irregulares  | Agrupamiento Regular de Manzanas   |
| Efectividad Práctica de la Solución                             | NO   | NO  | NO   |  |
| Principal Atributo Técnico a favor                              | Pionero en la oferta de soluciones a la Industria                            | Uso de Algoritmos para el Agrupamiento de Manzanas                                      | Utilización de Heurísticas efectivas y veloces   |  |
| Principal Atributo Técnico en contra                            | Poco estructurado y con captura de información y de parámetros muy intensiva | Muy evidente falta de optimización matemática. Resultados pobres                        | No es posible el manejo de escenarios multiobjetivos y además el agrupamiento es basado en polígonos irregulares |  |
| Calificación Final de Efectividad                               | 20%  | 40%   | 60%  |  |

### 3.8 Caso de estudio; revisión de las estrategias de solución implementadas en la ciudad de Monterrey para el apoyo en la toma de decisiones de la función logística.

En abril y mayo del año 2002, se desarrolló un experimento de campo para determinar la incidencia actual de las empresas grandes y medianas del AMM en cuanto a las metodologías que éstas aplican para resolver los problemas relacionados en el ámbito Logístico. Este tipo de empresas resultan lo suficientemente pertinentes como para requerir el empleo de herramientas de análisis cuantitativo. Además, de acuerdo a la empírica del postulante, coincide en que estas son el tipo de empresas o que ya invirtieron en Sistemas ERP-APS's o que al menos están por hacerlo. A continuación se muestra una tabla para la identificación y delimitación de la población de estudio.

Tabla 3.4 Distribución de empresas del AMM de acuerdo al sector industrial<sup>35</sup>.

**Identificación y delimitación de la población de estudio**

| # DE EMPRESAS  | TIPO EMP   |            |            |            | Total general |
|--|------------|------------|------------|------------|---------------|
|  | Sector     | GRANDE     | MEDIANA    | INTERMEDIA |               |
| INDUSTRIAL   | 60         | 47         | 72         | 109        | 288           |
| SERVICIOS  | 12         | 15         | 21         | 51         | 99            |
| VARIOS   | 11         | 10         | 12         | 52         | 85            |
| CONSTRUCCION   | 3          | 42         | 14         | 59         | 76            |
| ALIMENTICIO  | 22         | 14         | 15         | 14         | 65            |
| COMERCIO   | 12         | 6          | 5          | 31         | 54            |
| AUTOMOTRIZ   | 11         | 8          | 10         | 15         | 44            |
| FINANCIERO   | 5          | 2          | 2          | 10         | 19            |
| TEXTIL   | 6          | 1          | 2          | 4          | 13            |
| EDUCACION  | 3          | 1          | 2          | 3          | 9             |
| FARMACEUTICO   | 1          | 1          | 2          | 5          | 9             |
| EDITORIAL  | 2          | 1          | 1          | 2          | 6             |
| <b>Total general</b>   | <b>152</b> | <b>118</b> | <b>158</b> | <b>332</b> | <b>760</b>    |
| <b>Población de empresas del proyecto de investigación =</b> |            |            |            |            | <b>235</b>    |

De acuerdo al censo del GUIA-ROJI del 2000 (las 760 empresas de la guía-roji pueden variar con otros censos), tenemos un total de 235 empresas que reúnen las características delimitadas en la población de estudio. Procedemos ahora a calcular el tamaño de la muestra:

$N = \text{Tamaño de la Población} = 235$

$p = \text{Probabilidad muestral} \approx x / n = 5\% \quad \therefore q = 1 - p$

$e = \text{Error Estandar permitido} = 5\%$

$Z = \text{Nivel de Confianza} = 95\% \quad \therefore z = 1.96$

$$n = \frac{N * p * q}{\frac{N * e^2}{z^2} + p * q} = 55$$

<sup>35</sup> Fuente Guía Roji. (2000), *Censo de empresas del area metropolitana de la ciudad de Monterrey*, México.

Por lo anterior, tenemos entonces que el tamaño óptimo de la muestra con la cual se desarrolló el análisis fue de 55 empresas a un nivel de confianza del 95% y con un error estándar permitido del 5%.

### 3.8.a Estadística descriptiva de la investigación.

A continuación en las Tablas 3.5 al 3.8, se detallan algunas estadísticas descriptivas del estudio.

Tabla 3.5 al 3.8 Estadística descriptiva del muestreo de las empresas del AMM.

| # DE EMPRESAS        | CVE SOL   |            |            |            |            |           |           | Total general | % |
|----------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|---------------|---|
| CVE.PROB             | ND        | EXP        | PROP       | ERP        | APS        | MOD.OPT   |           |               |   |
| PLAN.RED.LOG         |           | 3          | 2          |            | 2          |           | 7         | 13%           |   |
| PLAN.LAYOUTS         |           |            |            |            | 1          |           | 1         | 2%            |   |
| BAL.CARGAS           |           | 1          | 1          |            |            | 1         | 3         | 5%            |   |
| PROG.DIST            |           | 5          | 1          |            | 4          |           | 10        | 18%           |   |
| PROG.PROD            |           | 3          | 3          |            | 14         | 6         | 28        | 51%           |   |
| NO DISPONIBLE        | 3         | 1          | 1          |            | 1          |           | 6         | 11%           |   |
| <b>Total general</b> | <b>3</b>  | <b>13</b>  | <b>8</b>   | <b>22</b>  | <b>7</b>   | <b>2</b>  | <b>55</b> |               |   |
| <b>%</b>             | <b>5%</b> | <b>24%</b> | <b>15%</b> | <b>40%</b> | <b>13%</b> | <b>4%</b> |           |               |   |

| # DE EMPRESAS        | ESTATUS    |            |            |           |            | Total general | %   |
|----------------------|------------|------------|------------|-----------|------------|---------------|-----|
| CVE.SOL              | NA.        | PLAN       | PROCESO    | ABORT     | OK         |               |     |
| EXP                  | 7          | 1          |            |           |            | 8             | 21% |
| PROP                 |            | 1          | 1          |           | 2          | 4             | 11% |
| ERP                  |            | 14         |            |           | 4          | 18            | 47% |
| APS                  |            | 1          | 4          | 1         |            | 6             | 16% |
| MOD.OPT              |            |            | 1          |           | 1          | 2             | 5%  |
| <b>Total general</b> | <b>7</b>   | <b>17</b>  | <b>6</b>   | <b>1</b>  | <b>7</b>   | <b>38</b>     |     |
| <b>%</b>             | <b>18%</b> | <b>45%</b> | <b>16%</b> | <b>3%</b> | <b>18%</b> |               |     |

| # DE EMPRESAS        | ESTATUS    |            |           |            | Total general |
|----------------------|------------|------------|-----------|------------|---------------|
| CVE.SOL              | PLAN       | PROCESO    | ABORT     | OK         |               |
| ERP                  | 14         |            |           | 4          | 18            |
| APS                  | 1          | 4          | 1         |            | 6             |
| <b>Total general</b> | <b>15</b>  | <b>4</b>   | <b>1</b>  | <b>4</b>   | <b>24</b>     |
| <b>%</b>             | <b>63%</b> | <b>17%</b> | <b>4%</b> | <b>17%</b> |               |

| # de Empresas        | TIPO       |            |            |            | Total general |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|---------------|
| CVE.SOL              | JOB SHOP   | ROUTING    | LOTSIZING  | FLOW SHOP  |               |
| EXPERIENCIA          | 2          | 5          |            | 1          | 8             |
| SIST.PROPIETARIO     | 3          | 1          |            |            | 4             |
| ERP                  | 7          | 4          | 4          | 3          | 18            |
| APS                  | 1          |            | 3          | 2          | 6             |
| MOD.OPT              |            |            |            | 2          | 2             |
| <b>Total general</b> | <b>13</b>  | <b>10</b>  | <b>8</b>   | <b>7</b>   | <b>38</b>     |
| <b>%</b>             | <b>34%</b> | <b>26%</b> | <b>21%</b> | <b>18%</b> |               |

Tamaño de la Población:  
235

Probabilidad de Suceso:  
5%  
2 Sucesos de 55 = 3.4%

% ERROR TOLERADO:  
5%

CONFIABILIDAD:  
95% 1.96

Tamaño de la Muestra (n):  
55

- Tabla 3.5: Estratificación de las empresas de acuerdo al tipo de problema logístico que están enfrentando y de acuerdo al tipo de solución que están llevando a cabo.
- Tabla 3.6: Estratificación de las empresas que enfrentan el problema de secuenciación logístico de acuerdo al tipo de solución que están llevando a cabo y su estatus a la fecha del estudio.
- Tabla 3.7: Estratificación de las empresas que enfrentan el problema de secuenciación logístico y que

han implementado como solución algún tipo de sistema ERP o APS y de acuerdo al tipo al estatus del proyecto a la fecha del estudio.

- Tabla 3.8: Estratificación de las empresas que enfrentan el problema de secuenciación logístico de acuerdo al tipo de secuenciación que se requiere resolver y a la solución que estuvieron llevando a cabo a la fecha del estudio.

En la tabla anterior se puede apreciar que la cantidad de empresas que afirmaron utilizar como estrategia de solución para sus problemas de logística el desarrollo de modelos matemáticos, sólo representan ser dos empresas. Estas 2 empresas al compararse contra las 55 de la muestra resulta apenas en un 3.4% lo cual comprueba y ratifica el valor de “p” que ya antes de manera previa se había estimado a un 5% al iniciar el experimento <sup>36</sup>.

### **3.8.b Exposición de resultados y conclusiones.**

La validez del experimento fue comprobada mediante una prueba de confiabilidad “Alfa Croanbach” mediante la utilización del Software SPSS versión 13.0 con un índice de 0.94 el cual nos calculó los siguientes resultados:

1. El análisis de comunalidad reporta que todas las variables aparecen por arriba de 0.83 por lo que no hay evidencia de que alguna de las variables tenga que ser omitida del instrumento.
2. El Análisis de Varianza Explicada demuestra que las variables del instrumento explican más del 91% de la varianza del instrumento.
3. La matriz de componentes principales (Constructos) evidencia que existe una fuerte correlación entre el “Tipo de operación” de la compañía respecto al “Tipo de problema” que actualmente enfrenta. Así también existe una fuerte correlación entre el “Tipo de solución” implementada en la compañía y el “Estatus actual” que guarda la solución del problema.
4. La Matriz de Factores de Rotación resultó con un índice de 0.197, lo cual es evidencia de que el factor de normalización que tuvo que ser aplicado en los datos fue pequeño.

La conclusión de los análisis aquí presentados, evidencia que el instrumento de medición es confiable y que por tanto la medición de los datos que de aquí se obtenga también lo es. Por tanto, a continuación se describen los resultados de la investigación:

---

<sup>36</sup> Supra, pag 85.

1. La incidencia de las empresas que mencionó a la logística estratégica como parte de su problemática actual es sólo el 13%, es decir únicamente 7 empresas de las 55. En lo que se refiere a la *logística táctica* ésta se lleva el 7% de incidencia.
2. Por lo anterior se comprueba que en el AMM, el 70% de las 55 empresas revisadas, es decir 38 empresas, declaran enfrentar actualmente problemas relacionados a la logística operativa.
3. De este último 70%, la clasificación a su vez se desdobra de la siguiente manera:
  - a. Programación de Producción discreta "Job Shop Scheduling" (34%)
  - b. Programación de Producción continua "Lotsizing Scheduling": (21%)
  - c. Programación de Producción flexible "Flow Shop Scheduling": (18%)
  - d. Programación de Ruteo "Routing Scheduling" : (26%)
  - e. Programación de Recursos "Workforce Scheduling" : (0%)
4. A partir de este mismo 70% de empresas, se observa también la siguiente clasificación:
  - a. El 5% de las empresas declaró utilizar modelos de optimización como método de solución.
  - b. El 32% de empresas manejan métodos basados en la experiencia o en sistemas propietarios.
  - c. El 63% de las empresas basan su estrategia en el uso de tecnología comprada. A su vez el 80% de estas empresas, están en planes de implementación de un Sistema ERP o APS.
5. De lo anterior resulta que más del 80% de la logística operativa redundante en problemas de Scheduling catalogados como "Job Shop", "Lotsizing" y "Routing".
6. De las 55 empresas de la investigación tenemos que solo el 11% afirmaron NO enfrentar actualmente ningún problema logístico. Esto no es evidencia suficiente de que efectivamente no enfrente actualmente el problema, sin embargo esto rebasa el alcance de la investigación.

Los resultados anteriores obtenidos a partir de una muestra de 55 empresas grandes y medianas de la Ciudad de Monterrey, hacen concluir que son relativamente muy pocas las empresas (7) las que estuvieron dispuestas a invertir en sistemas APS. Más aún, las implementaciones de estos sistemas APS no han logrado aún resolver en términos reales sus problemas de logística.

### 3.9 Comentarios finales.

A lo largo de este capítulo se describieron y se modelaron en términos matemáticos algunos de los problemas más frecuentemente enfrentados en las áreas de logística. Cada uno de estos problemas contiene sus propias características y propiedades que los hacen interesantes y dignos de exploración en términos de una investigación más exhaustiva. La presente tesis doctoral se concentrará en dar solución a uno de estos problemas, el cual fue nombrado genéricamente como un problema de logística de ruteo de distribución.

La revisión bibliográfica hecha en el apartado 3.6 así como las investigaciones de campo expuestas en el apartado 3.7 evidencian que en realidad lo que más aflora a la superficie en los sistemas del tipo APS es la falta de rigor matemático en sus métodos de optimización. Como remedio a lo anterior, pareciera que estos sistemas APS promovieran la utilización de metodologías basadas en conceptos tales como "Logística Colaborativa". El concepto anterior no es equivocado, sin embargo esto no es optimización sino tan solo se trata de reingeniería.

Desde un punto de vista rigurosamente científico, los algoritmos computacionales incluidos en los sistemas APS, no contienen modelos de optimización basados en motores matemáticos. Cuando mucho presentan indicios de utilizar heurísticas poco sofisticadas para su ejecución. Por tanto, las soluciones que estos ofrecen, no solamente dejan de ser óptimas matemáticamente hablando, sino también pocas veces incluyen las consideraciones que en la práctica se requieren en las empresas.

Así pues al día de hoy, las empresas solo tienen dos alternativas de acción, o siguen "apostando" fuertes sumas de dinero a las soluciones del tipo APS que hay en el mercado tras la promesa de alcanzar la tierra prometida para la solución de la logística, o se deciden a invertir en investigación y desarrollo para generar soluciones propias y especializadas que realmente sean óptimas y resuelvan el problema.

Como se pudo apreciar particularmente en el estudio de campo cubierto en el apartado 3.8, los problemas de optimización de ruteo en las empresas del área metropolitana de la ciudad de Monterrey, caracterizan mas del 25% del tipo de problemas que actualmente se enfrentan en las áreas de logística de las empresas que fueron muestreadas. Por tal motivo consideramos que dicho tipo de problema es digno de ser analizado para ser tratado y resuelto en nuestro proyecto de investigación. Dicha tarea se inicia en el siguiente capítulo de la tesis en la cual se abordarán los fundamentos matemáticos requeridos para atender los problemas de logística de ruteo.



*La ciencia ha explorado el microcosmos y el macrocosmos; ahora tenemos una buena idea de la superficie de la tierra.*

*La gran frontera aún inexplorada es la complejidad.*

*Heinz Pagels*

## **4. Fundamentos matemáticos para problemas de logística de ruteo.**

### **4.1 Introducción: significado del concepto “problema difícil de resolver” (NP-Hard).**

El OR/MS, nació hace ya más de cincuenta años cuando George Dantzig inventó el método Simplex para resolver problemas de optimización lineal, es decir, problemas cuyas variables de decisión son continuas y relacionadas de manera lineal. Aun cuando en sus orígenes, esta naciente área de la ciencia fue motivada por aplicaciones de carácter militar, el OR/MS fue alcanzando un alto grado de interés entre investigadores y profesionistas en los campos de ingeniería, matemáticas aplicadas y administración, quienes motivados por los diversos y complejos problemas de toma de decisiones que surgían en varias áreas del quehacer científico e industrial, comenzaron a estudiar y desarrollar metodologías de solución para problemas de diferentes características. Fue así como nacieron posteriormente otras ramas de la optimización tales como:

- a. Optimización NO lineal: manejo de relaciones no lineales entre las variables de decisión.
- b. Optimización discreta: variables enteras y/o binarias para el manejo de condiciones en las cuales se requiere restringir y/o explotar ciertas propiedades de los problemas en cuestión.
- c. Optimización entera mixta: manejo de variables continuas y discretas.

El OR/MS se encuentra en prácticamente todos los tipo de industrias. Es evidente que las corporaciones aspiran a tomar decisiones que les reditúen en beneficios económicos, y normalmente, estas decisiones se encuentran restringidas de forma muy compleja. Estos atributos son únicos de los modelos de OR/MS. “En las últimas décadas el impacto del OR/MS en la industria ha sido impresionante, convirtiéndose en ganancias con frecuencia multimillonarias en los diversos ramos industriales”<sup>37</sup>.

Establecer cuándo un problema es “fácil” o “difícil”, equivale a determinar cuándo un problema es NP-Hard y cuándo no. Determinar lo anterior está íntimamente ligado al tiempo computacional requerido

---

<sup>37</sup> Ríos, Roger. (1999), *Aplicaciones del TSP*, "Ingenierías 2(4)", México, pag 18-23.

para la solución de cada problema en cuestión. Sin entrar en detalles técnicos, podemos afirmar que un problema es “fácil” de resolver, es decir no es un problema NP-Hard, cuando es posible encontrar un algoritmo o método de solución, cuyo tiempo de ejecución computacional crece de forma moderada (o polinomial) respecto al tamaño del problema. Por el contrario, si no existe tal método de solución o algoritmo que pueda resolver el problema en un tiempo polinomial, entonces decimos que el problema es “difícil” de resolver o NP-Hard.

El término utilizado en Complejidad Computacional denominado “NP-Hard” ha sido siempre visto como el icono y la cima de la inherente intratabilidad de los modelos matemáticos que los investigadores crecientemente afrontan durante el desarrollo de sus algoritmos para resolver problemas complejos. Probar la complejidad de un problema, es decir probar si un problema es NP-Hard, puede llegar a ser tan complejo como al igual resulta tratar de encontrar algún algoritmo eficiente para resolver el problema en sí. Descubrir que un problema en particular es “NP-Hard” es usualmente el inicio de cualquier trabajo de investigación dedicado a resolverlo. Dicho de otro modo, esta primera fase de la investigación proporciona información valiosa acerca de cual enfoque o estrategia sería la más adecuada para resolver el problema en cuestión.

El hecho de que un problema sea NP-Hard, no implica que el problema no pueda resolverse, sino que cada algoritmo existente para la solución del problema tiene un tiempo de ejecución que crece explosivamente (o exponencialmente) de acuerdo al tamaño del problema que se esté requiriendo resolver. La consecuencia directa de un algoritmo que para su ejecución computacional, tiene una función de tiempo exponencial es que a medida que aumenta el tamaño del problema, el tiempo requerido para la solución aumenta de forma exponencial, lo cual limita bastante el tamaño de los problemas que pueden resolverse en la práctica.

Matemáticamente hablando, determinar si un problema es NP-Hard o no se denomina establecer la complejidad computacional del problema. El campo de la “Complejidad Computacional” es toda una disciplina por separado cuyo propósito especial es específicamente demostrar cuando un problema es NP-Hard. El “Problema del Agente Viajero” (o TSP), es quizás el problema clásico del tipo NP-Hard para el cual mayor investigación se ha desarrollado a lo largo de la historia. El TSP como tal, tiene muy diversas aplicaciones para resolver problemas de secuenciación de tareas en manufactura así como problemas ruteo de vehículos en el ramo de la logística. El TSP tiene la particularidad de que es un problema relativamente sencillo de formular pero por otro lado es muy difícil de resolver (NP-Hard).

Aunque será hasta el siguiente punto cuando se abordará de lleno la definición del TSP, con la finalidad de comprender aún mejor la naturaleza de los problemas tipo NP-Hard; supongamos entonces una instancia del TSP con “n” nodos. Una forma poco eficiente de resolver el problema, sería por enumeración exhaustiva. Es decir, probar todas las posibles combinaciones de soluciones que pueda tener el problema en cuestión y al revisar cada una de las soluciones, pues simplemente se escoge la mejor de todas ellas.

Para nuestro caso tendríamos que procesar  $(n-1)!$  combinaciones para recorrer todas las posibilidades de manera enumerativa. Esto resulta en un esfuerzo computacional enorme ya que  $n! = n(n-1)(n-2)\dots(2)(1)$ . Para cada una de estas  $(n-1)!$  combinaciones habría entonces que calcular la solución del problema, eligiendo de entre todas estas combinaciones aquella solución que sea la mejor.

Para el procedimiento antes explicado (enumerativo), decimos que el problema ha quedado totalmente resuelto ya que hemos procesado todas las combinaciones posibles. El tiempo de ejecución de este algoritmo decimos que crece de acuerdo a una función del tipo  $f(n)=(n)!$  (función de crecimiento exponencial). Esta función de crecimiento puede comprenderse que es “no polinomial” y por tanto deja de ser viable su implementación computacional sobre todo en el caso de instancias grandes. Por ejemplo, en el caso de que tengamos una red con 5 nodos ( $n=5$ ), tendríamos que calcular  $4!$ , lo que equivale a 24 combinaciones. Lo anterior en realidad no es un impedimento en términos computacionales. Sin embargo al considerar una red de 50 nodos ( $n=50$ ), el número posible de tours es igual a  $49!$ , el cual es un número tan gigantesco que no alcanzaría a resolverse en varios meses ni en la computadora más potente del mundo. Cabe mencionar que una red de 50 nodos, apenas si se considera un problema de tamaño mediano.

Aunque la función factorial  $f(n)=n!$ , se define como una función que crece exponencialmente a medida que crece el valor de “n”, lo anterior, no resulta evidencia suficiente para comprobar que el TSP sea un problema NP-Hard, ya que quizás pudiera existir algún algoritmo que lo pudiera resolver en un tiempo de ejecución polinomial. En este caso, sin embargo, ya se ha demostrado que tal algoritmo con comportamiento polinomial no existe y que por lo tanto irreductiblemente el TSP pertenece a la clase de problemas NP-Hard <sup>38</sup>. Con el fin de dimensionar la diferencia entre la naturaleza de una función

---

<sup>38</sup> Garey, D. (1979), *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, Freeman, New York, pag 230-242.

con crecimiento polinomial y una con crecimiento exponencial, a continuación se muestra la tabla 4.1 extraída de Garey. Las cifras que se muestran, representan el tiempo de procesamiento que ocuparía una computadora que pudiera procesar 1 millón de operaciones de punto flotante por segundo. Nótese el crecimiento explosivo (exponencial) que se tiene en las últimas dos columnas de la tabla 4.1, lo anterior muestra el incremento sustancial de tiempo requerido (años y siglos) para la obtención computacional de la solución óptima.

Tabla 4.1 Tiempo computacional de acuerdo al grado de complejidad de un problema <sup>39</sup>.

| Tamaño<br>$n$ | $f(n)=n$      | $f(n)=n^2$   | $f(n)=n^3$  | $f(n)=n^5$     | $f(n)=2^n$      | $f(n)=3^n$                     |
|---------------|---------------|--------------|-------------|----------------|-----------------|--------------------------------|
| 10            | .00001<br>seg | .0001<br>seg | .001<br>seg | .1<br>seg      | .001<br>seg     | .059<br>seg                    |
| 20            | .00002<br>seg | .0004<br>seg | .008<br>seg | 3.2<br>seg     | 1.0<br>seg      | 58<br>minutos                  |
| 30            | .00003<br>seg | .0009<br>seg | .027<br>seg | 24.3<br>seg    | 17.9<br>minutos | 6.5<br>años                    |
| 40            | .00004<br>seg | .0016<br>seg | .064<br>seg | 1.7<br>minutos | 12.7<br>días    | 3855<br>siglos                 |
| 50            | .00005<br>seg | .0025<br>seg | .125<br>seg | 5.2<br>minutos | 35.7<br>años    | $2 \times 10^8$<br>siglos      |
| 60            | .00006<br>seg | .0036<br>seg | .216<br>seg | 13<br>minutos  | 366<br>siglos   | $1.3 \times 10^{13}$<br>siglos |

Como complemento a lo expuesto anteriormente en la Tabla 4.1, a continuación en la siguiente hoja, se muestra en la figura 4.1 una breve explicación acerca de que es lo que significa el que un problema sea nombrado como "NP-Hard". Aunque una de las características de este tipo de problemas es que su espacio solución es enorme, no obstante la figura 4.1 lo que busca ilustrar es lo "intrincado" que resulta éste espacio, al igual que la falta de información necesaria para poder explorarlo eficientemente. Así entonces hablar de un problema "NP-Hard", equivale a decir que éste es intratable a través de los medios matemáticos convencionales.

<sup>39</sup> Ríos, Roger. (1999), *Aplicaciones del TSP*, "Ingenierías UANL 2(4)", México, pag 18-23.

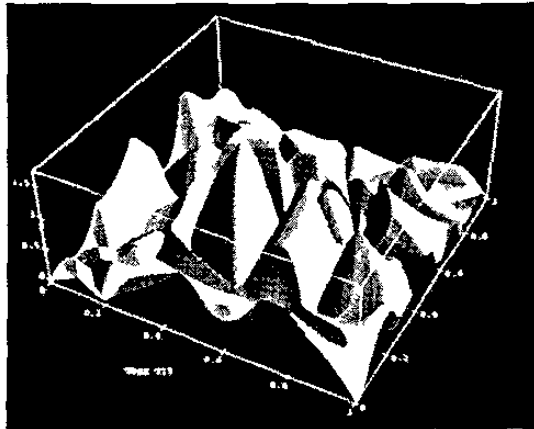
## Porqué se aplican los AG en los NP-Hard ?

Con una computadora que pueda procesar 1000 millones de Comb/segundo tomaría: 8 mil millones de millones de años

Por ejemplo, una red con 30 nodos tendría 30! combinaciones:  
 $2.65 \times 10^{32}$

Consiste en encontrar la ruta más corta que haga visitar "n" cantidad de nodos

El espacio de búsqueda es sumamente grande y complejo imposibilitando el uso de las matemáticas convencionales



Un problema famoso tipo NP-Hard es el problema del Agente Viajero (TSP)

Se dispone de poco conocimiento del espacio solución que permita delimitarlo.

La "campaña" es topográficamente compleja y llena de puentes, túneles y pasajes "intrincados"

Encontrar el camino correcto redunda en la intratabilidad de los problemas NP-Hard a través de las matemáticas.

Figura 4.1 Intratabilidad matemática del TSP.

## 4.2 Introducción al problema del agente viajero (TSP).

Ya antes en la figura 4.1, se expuso que uno de los problemas más famosos y difíciles en la teoría de optimización es el problema del agente viajero o también denominado (Traveling Salesman Problem o TSP). Para el problema del TSP, han sido la simplicidad de su formulación aunado a la dificultad para resolverlo, los factores que atrajeron a investigadores en las áreas de matemáticas discretas en todo el mundo a estudiar el problema. Aunado a lo anterior, el interés en el estudio de técnicas para su solución es motivado por la enorme cantidad de aplicaciones prácticas de problemas de toma de decisiones donde éste aparece como subestructura. Se hará una breve introducción al igual que algunas de sus aplicaciones prácticas.

El problema del TSP se formula de la siguiente manera: un agente viajero, partiendo de su ciudad de origen, debe visitar exactamente una vez cada ciudad de un conjunto de ellas previamente especificadas y retornar al punto de partida<sup>40</sup>. Un recorrido con estas características, es llamado dentro de este contexto un "tour". El problema consiste en encontrar el tour para el cual la distancia total recorrida sea mínima. Se asume que se conoce, para cada par de ciudades, la distancia entre ellas. La Figura 10 ilustra un tour en una instancia de ocho ciudades. Representada por un grafo, donde cada nodo del grafo corresponde a una ciudad y cada arco que une a un par de nodos representa la parte del tour que pasa por dichos nodos. En la Figura 4.2, se ilustra el tour que visita las ciudades 1, 2, 3, 8, 5, 4, 7, 6 y 1, en ese orden.

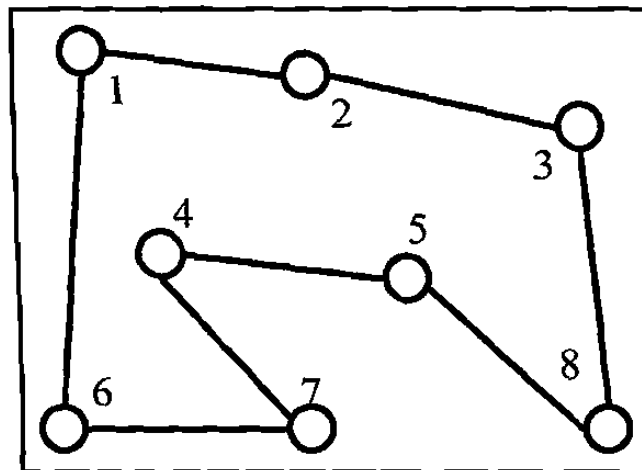


Figura 4.2 Un tour en un TSP de ocho ciudades

<sup>40</sup> Lenstra, J. (1985), *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*, Editorial Wiley, Chichester England, pag 30-45.

En la solución computacional de los problemas como el TSP, es importante evaluar las ventajas y desventajas que surgen entre la obtención de soluciones de alta calidad contra los recursos y tiempo computacional empleados para obtenerla. Como ya antes se comentó, el problema del TSP en sí es fácil de formular, sin embargo, al igual que muchos otros que se presentan en el campo de optimización discreta (o también optimización combinatoria), es sumamente difícil de resolver (NP-Hard). Cuando decimos “resolver”, nos referimos a encontrar la solución óptima al problema y a probar que ésta es efectivamente la mejor solución posible.

Para 1990 y tomando en consideración los antecedentes revisados, la instancia del TSP de mayor tamaño que había sido resuelto era una de 318 nodos. Hoy en día existen métodos basados en técnicas de ramificación y corte/acotamiento, las cuales han obtenido provecho al explotar efectivamente la estructura matemática del problema. En 1998, se reportó la instancia del TSP más grande que se ha resuelto hasta nuestros días, estamos hablando de una red de 13,509 nodos la cual fue resuelta mediante la aplicación de computadoras interconectadas con procesamiento paralelo<sup>41</sup>. El tiempo requerido para dicha solución no es mencionado en la obra antes citada, lo que si es previsible es que dicho tiempo haya sido *significativamente menor en términos relativos por haberse tratado de un experimento con procesadores computacionales en paralelo.*

A pesar de que lo anterior evidencia el tremendo progreso logrado durante la década de los noventa, es importante precisar en este momento que el caso de nuestro proyecto de investigación no busca enfrentar el reto algorítmico y computacional para solucionar problemas del TSP de gran envergadura (por ejemplo arriba de 1000 nodos), sino mas bien se concentra *en dar tratamiento a una variante más sofisticada perteneciente a la familia de los problemas relacionados al TSP.* Dejaremos la exposición de dicha variante para el capítulo 6.

---

<sup>41</sup> Optima. (1998), *Mathematical Programming Society Newsletter*, EUA, pag 58.

### **4.3 Aplicación del TSP en problemas generales de secuenciamiento en manufactura.**

Existen razones prácticas que hacen importante al problema del TSP. Muchos problemas reales en el área de manufactura y de logística pueden formularse como instancias del TSP. Por ejemplo el problema de secuenciamiento para la programación de tareas en una máquina. Supongamos entonces un taller de manufactura en el cual se cuenta con una sola máquina en la cual es posible procesar diferentes tareas, una a la vez.

Ahora bien, para procesar cada una de estas tareas, la máquina requiere de cierta configuración característica de la tarea, pueden ser: número y tamaño de diferentes dados, colocación de cuchillas a cierta distancia unas de otras, colorantes para alguna fibra, etc. De manera que una vez que una tarea ha sido terminada, es necesario preparar la máquina para procesar una nueva tarea, aquí será necesario invertir un cierto tiempo, y este tiempo dependerá de la tarea recién procesada así como de la siguiente tarea a procesar. Si las características de una tarea son similares a las de otra, es adecuado pensar que el tiempo que se requiere para pasar de una configuración a otra será pequeño, en comparación con el tiempo que sería requerido para pasar de una tarea a otra con características o configuraciones de fabricación muy diferentes.

La problemática aparece al percatarnos que durante las labores de preparación de la máquina, ninguna de las tareas se puede ejecutar. Así, este tiempo correspondiente al recurso productivo en cuestión se pierde inevitablemente provocando como consecuencia un desaprovechamiento en la capacidad de manufactura, no solo de la máquina, sino también de todo el resto de los recursos que se dejan de aprovechar durante los tiempos de preparación antes mencionados. Lo anterior, representa un costo de oportunidad para la empresa. Por tanto, el problema consiste entonces en encontrar el orden o la secuencia en que se deben procesar las tareas con la finalidad de minimizar el tiempo total que transcurre en el sistema en el cual se están ejecutando labores de preparación.

Así pues, aunque este problema de secuenciamiento aplicado para un ambiente de manufactura parezca no tener ninguna relación con el problema del TSP, existen ciertas similitudes que permiten que se pueda formular matemáticamente de la misma manera. Es decir, cada una de las tareas a ser procesadas en la máquina puede ser vista como cada uno de los nodos que se requieren visitar en la red. Por otro lado, el tiempo necesario para cambiar la configuración de la máquina entre una tarea y otra corresponde a la distancia que hay que recorrer para trasladarse de un nodo al siguiente durante la



conformación del tour. Entonces encontrar la manera de ordenar las tareas para minimizar el tiempo total de preparación equivale en un problema de ruteo a encontrar la secuencia de los nodos a ser visitados en una red para formar la ruta óptima que minimice la distancia total recorrida. Lo anterior nos debe ofrecer una buena perspectiva de lo crucial que resulta tener buenos algoritmos para la solución de problemas para el TSP, inclusive aplicado para ambientes de manufactura.

#### 4.4 Clasificación de los métodos propuestos para solución del TSP.

Como ya se expuso en el apartado anterior, la implicación directa de un problema NP-Hard es que cualquier algoritmo empleado para encontrar su solución óptima emplea un tiempo de cómputo que crece exponencialmente con el tamaño de la instancia del problema. Por tal motivo, se origina la necesidad de emplear heurísticas, las cuales son procedimientos que aunque no garantizan una solución óptima al problema, si ofrecen una solución factible relativamente cercana al óptimo y en un tiempo de ejecución computacional razonable<sup>42</sup>.

Los problemas “NP-Hard” en las últimas tres décadas han sido muy estudiados. Se han explorado múltiples técnicas para la búsqueda de algoritmos eficientes en la solución de este tipo de problemas. Básicamente las técnicas de solución pudieran ser clasificadas en 3 grandes rubros: métodos enumerativos, métodos exactos y métodos heurísticos.

Los métodos enumerativos o también denominados de “fuerza bruta”, como su nombre lo indica enumeran el conjunto de combinaciones numéricas explícitamente, analizando el total o al menos una parte del espacio de búsqueda. En cada combinación o enumeración se requiere verificar el cumplimiento de las restricciones para asegurar cuando existe realmente una solución y a su vez cuando ésta supuesta solución alcanza el punto de optimalidad respecto a las soluciones previamente alcanzadas. La desventaja de estos métodos es que pueden resultar extremadamente lentos para la exploración del espacio solución. Aún con la tecnología computacional actual se pudieran requerir siglos para la solución de problemas apenas de tamaño típico.

El segundo grupo corresponde a los métodos exactos. Estos métodos son mucho más inteligentes que los de “fuerza bruta” descritos en el primer grupo. Los métodos de este tipo son aquellos normalmente utilizados en Programación Lineal (LP), Programación NO Lineal (NLP), Programación Entera (IP), Programación Binaria (BP) y por supuesto en la Programación Mixta (MIP). Aún este tipo de métodos, cuando son aplicados para el mismo grupo de problemas mencionados antes, pueden quizás no requerir siglos, pero si acaso meses o años en términos de esfuerzo computacional para resolverlos. Como es de imaginar, en la práctica logística convencional no es posible esperar a veces ni siquiera horas antes de

---

<sup>42</sup> Goldberg, David. (1989), *Genetic Algorithms in Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, EUA, pag 412.

requerir estar tomando una decisión para un problema típico. Los métodos de solución exacta, por definición tienen el objetivo de encontrar la solución óptima verdadera para los problemas de optimización. Algunos de estos métodos serán revisados más adelante en el apartado 4.8.

El tercer grupo corresponde a las técnicas heurísticas. El concepto “Heurística”, proviene del griego “euriskein” que significa encontrar ó descubrir. El Matemático Arquímedes la utilizó por 1era vez: cuando el utilizó la palabra “Eureka”. Los métodos heurísticos, son algoritmos que sin ofrecer una garantía de éxito, aproximan buenas soluciones en tiempos razonables para problemas que normalmente no pueden ser tratados mediante métodos enumerativos<sup>43</sup>.

Estos métodos son muy útiles en la actualidad, pues a pesar de que sólo se obtienen soluciones satisfactorias y casi nunca la solución óptima exacta, los mismos son muy efectivos para problemas de gran tamaño y complejidad. La clave consiste en elegir convenientemente el tipo de heurística, de acuerdo al tipo de problema que se plantee resolver. A este último respecto, podemos añadir que básicamente existen dos grandes clases de heurísticas. La primera clase corresponde a aquellas heurísticas que son especializadas de acuerdo al tipo de problema. Así por ejemplo en el siguiente apartado 4.5 se expondrán algunas de estas en lo que se refiere a aplicaciones especializadas para el problema del TSP.

La segunda clase corresponde a las heurísticas de propósito general o también llamadas meta-heurísticas. Entre las técnicas meta-heurísticas más utilizadas en la actualidad se mencionan las siguientes sólo con la finalidad de situar al lector en el tema:

1. Búsqueda tabú: basado en el psicoanálisis freudiano, el cual se ampliará en el apartado 4.6
2. El algoritmo genético: proveniente de la evolución biológica.
3. El enfriamiento simulado: proveniente del campo de la mecánica estadística.
4. La colonización de hormigas: proveniente del mecanismo mediante el cual las hormigas buscan su alimento.

El método basado en los “algoritmos genéticos” será la meta-heurística propuesta para el problema de investigación, la cual será desarrollada ampliamente en el capítulo 5. A continuación en los apartados 4.5 al 4.8 se exponen algunos de los métodos mencionados hasta aquí. En el apartado 4.9 se resumirán los métodos mencionados a través del uso de una tabla esquemática.

---

<sup>43</sup> Greenberg , H. (1996), *Mathematical Programming Glossary*, disponible en <http://www.cudenver.edu/~hgreenbe/glossary>.

#### 4.5 Revisión de métodos basados en heurísticas para la solución del TSP.

Las heurísticas de propósito especial que han sido propuestas para resolver el TSP se han denominado así debido a que explotan la estructura y las características particulares del problema. Una heurística que ha sido particularmente estudiada para este tipo de problemas es la heurística de tipo miope (o Greedy en inglés). Es llamada así porque en su estrategia de búsqueda sólo se intenta mejorar la solución actual sobre la base de una exploración de otras alternativas dentro del vecindario local, sin buscar más allá de un cierto entorno muy cercano. Dentro de estas heurísticas existen algunas variantes las cuales irremediablemente se desarrollan a partir de la explotación de las características particulares de cada tipo de problema en cuestión.

1. Heurística del vecino más cercano: esta heurística se emplea en la fase de construcción del tour o solución inicial. Por tratarse de un procedimiento constructivo, se parte al elegir un nodo inicial, llamémoslo  $j_1$ . Una vez seleccionado, se mide la distancia que hay de este nodo a los restantes, y a continuación la heurística indica ahora elegir aquél otro nodo cuya distancia al nodo inicial sea la mínima, es decir, elegimos al vecino más cercano. Este nodo agregado se le llama  $j_2$ . A partir de aquí la heurística se va aplicando de manera constructiva hasta lograr alcanzar una trayectoria de abarque todos los nodos de la red ( $j_1, j_2, j_3, \dots, j_k, j_{k+1}, \dots, j_n$ ), donde el nodo  $j_{k+1}$  se elige tomando la mínima distancia que hay desde  $j_k$  hasta cada uno de los nodos que sean distintos de los ya elegidos durante el procedimiento recursivo.

Al terminar con el último nodo, se agrega un último arco que va del nodo " $j_n$ " hasta el nodo " $j_1$ " para entonces finalizar cerrando el tour por completo. Esta heurística es muy eficiente computacionalmente hablando en las primeras iteraciones, sin embargo, la desventaja que presenta es que en las últimas fases de la construcción del tour, el procedimiento puede verse obligado a tener que elegir arcos cuya longitud sea particularmente grande, especialmente en la última que va desde  $j_n$  a  $j_1$ .

2. Heurística de inserción más cercana: este procedimiento también es constructivo, pero en contraste con el anterior, en el cual se tiene sólo un camino, y sólo hasta el final se completa un tour; aquí tenemos subtours, los cuales van creciendo hasta completar un tour que abarque todos los nodos. El algoritmo inicia con un subtour denominado T. A partir de aquí se busca insertar el nodo "más cercano" a este subtour con la intención de ampliarlo. Para lograr lo anterior el procedimiento requiere examinar primero todos los nodos  $j$  que no estén aún incluidos en T. De lo anterior se calcula entonces

la distancia de cada uno de estos nodos hacia  $T$  lo cual llamaremos  $d(j, T)$ . Así pues,  $d(j, T)$  es la distancia mínima que hay desde el nodo  $j$  a cualquiera de los nodos que pertenecen a  $T$ . A continuación se ordenan las  $d(j, T)$  en forma ascendente. Así, llamemos " $j^*$ " al nodo que se encuentra al principio de esta lista, es decir, al nodo "más cercano" a  $T$ .

A partir de aquí se selecciona dentro del subtour  $T$  al nodo que se encuentre "más cerca" de  $j^*$ , esto es, medimos la distancia desde  $j^*$  a cada uno de los nodos que actualmente conformen al subtour  $T$ . Llamaremos  $k^*$  a aquel nodo dentro de  $T$ , cuya distancia a  $j^*$  sea la menor de todas. Finalmente el procedimiento de inserción logra ampliar el subtour insertando a  $j^*$  entre  $k^*$  y alguno de sus dos nodos vecinos que estén contiguos dentro del subtour  $T$ . Para lograr establecer cuál de los dos nodos contiguos ( $k_1$  y  $k_2$ ) es el que resulta más viable para aplicar el procedimiento de inserción, entonces se calcula la distancia que hay de ( $k_1$  a  $k^*$ ) y de ( $k^*$  a  $k_2$ ). Ambas distancias son de hecho dos arcos que actualmente se encuentran incluidos dentro del subtour  $T$ . Si el arco de  $j^*$  a  $k_1$ , es menor o igual que el arco de  $j^*$  a  $k_2$ , entonces  $j^*$  se inserta entre  $k_1$  y  $k^*$ . En caso contrario se inserta  $j^*$  entre  $k_2$  y  $k^*$ . Así pues, el proceso termina una vez que se haya construido un tour completo.

En ambas heurísticas revisadas antes, no se puede garantizar que se produzca una buena solución. Es decir, no existe una garantía de desempeño en la calidad de la solución. Para explicar a que nos referimos con una garantía de desempeño, utilizaremos un ejemplo particular de un problema al cual denotaremos por " $T$ ". A partir de aquí  $A(I)$  será entonces el valor producido por la heurística o el algoritmo que estemos usando para resolver el problema " $T$ ". Si ahora entonces definimos que  $OPT(I)$  sea el valor de la solución óptima para " $T$ " entonces tenemos que  $OPT(I)$  debe de ser menor o igual que la longitud de cualquier otro tour, por lo que  $OPT(I) \leq A(I)$ . Luego entonces el algoritmo de aproximación tiene una garantía de comportamiento  $c^*$ , donde  $c^*$  es un número real, si para cualquier instancia del problema  $I$ , se puede probar que  $A(I) \leq c^* OPT(I)$ .

Este valor  $c^*$  indica que si su valor es 1, entonces el algoritmo de aproximación siempre producirá la solución óptima, ya que combinando las dos desigualdades, se tiene que  $OPT(I) = A(I)$ . Por otra parte, su valor no puede ser menor que 1, ya que en ese caso, se tendría que  $A(I) < OPT(I)$ , es decir el algoritmo de aproximación produciría un valor mejor que el óptimo, lo cual es imposible. Así que  $c^*$  tiene que ser un valor mayor o igual que 1. Ahora bien, mientras más cerca se encuentre de  $c^*$  respecto a la unidad (1), entonces tenemos que el algoritmo de aproximación, obtendrá soluciones que se encuentran cerca del valor óptimo. Por el contrario, si este valor es grande, esto indica que se pueden

producir soluciones alejadas del valor óptimo.

Aunque en el caso del TSP no se tiene un algoritmo que ofrezca una garantía para la obtención de una solución exacta (óptima), es posible tener algoritmos que ofrezcan garantías de desempeño en términos predecibles. Para esto la condición particular que se requiere por parte de estos algoritmos es que las instancias examinadas posean la propiedad de desigualdad del triángulo. Esta propiedad puede describirse de la siguiente manera: para viajar de un nodo a otro es más corto hacerlo directamente que pasando por un nodo intermedio. Más formalmente, se tiene que cumplir que la distancia del nodo "i" al nodo "j" para cualquier par de nodos debe de ser menor o igual ( $\leq$ ) que la distancia requerida para ir del nodo "i" a nodo "k" más la distancia para ir del nodo "k" al nodo "j".

Si la propiedad anterior se cumple para todos los nodos de la red, entonces sí es posible dar una garantía de desempeño. Por ejemplo aplicando lo antes mencionado para la heurística del vecino más cercano, podemos definir  $NN(I)$  como la solución ofrecida por dicha heurística. Entonces es posible demostrar que para cualquier instancia del problema  $I$  con  $n$  nodos, se tiene un valor de  $c^*$  que puede garantizar un desempeño respecto a la solución óptima. El valor que guarda  $c^*$  respecto a  $NN(I)$  y a  $OPT(I)$  se define a través de la siguiente desigualdad <sup>44</sup>:

$$NN(I) \leq \frac{1}{2} (\log 2 n + 1) * OPT(I)$$

Por otro lado, para valores arbitrariamente grandes de  $n$  (instancias del TSP de tamaño grande), la función que expresa la garantía de desempeño de acuerdo a Christofides se define por:

$$NN(I) > \frac{1}{3} (\log 2 (m + 1) + \frac{4}{3}) OPT(I)$$

Ambas desigualdades, lo único que evidencian es que las soluciones ofrecidas por la heurística del vecino más cercano, dejan mucho que desear. En la primera desigualdad no tenemos un valor constante que nos dé una garantía para todas las instancias, ya que  $c^*$  está definida por una función exponencial así que en todo caso podríamos decir que  $c^* = \infty$ . Luego la segunda desigualdad nos asegura que encontraremos instancias para las cuales la heurística produce valores muy alejados de la solución óptima.

---

<sup>44</sup> Christofides, N. (1976), *Worst-case analysis of a new heuristic for the traveling salesman problem*, "Report 388 Graduate School of Industrial Administration", Carnegie-Mellon University, Pittsburgh EUA, pag 121-140.

De las heurísticas desarrolladas para el problema del TSP tenemos el trabajo hecho por Christofides como aquel algoritmo que mejor garantía de desempeño ofrece<sup>45</sup>. El trabajo de Christofides combina varias heurísticas, entre ellas las que hemos revisado al principio del presente tema, con la finalidad de construir un tour óptimo. No obstante ser la mejor heurística conocida para el TSP, su garantía de desempeño apenas si logra alcanzar un valor de  $c^* = 3/2$ . La implicación de este valor para  $c^*$  es que, cualquier solución que construyamos con este esquema de aproximación, nos asegurará apenas un valor que nunca excederá en 50 % al valor de la solución óptima.

Algo muy interesante es que si eliminamos esta propiedad de la desigualdad del triángulo, resulta entonces que es imposible obtener un algoritmo de aproximación cuyo comportamiento de tiempo computacional sea polinomial y que tengan una garantía de desempeño. Es decir, si tal construcción fuese posible, equivaldría a entonces decir que existe un algoritmo polinomial que resuelve en forma exacta el TSP. Por el motivo Christofides concluye en su obra que el TSP, desde su variante más básica, es ineludiblemente un problema tipo NP-Hard <sup>46</sup>.

Tomando en cuenta la implicación de que la heurística de Christofides apenas nos asegura una solución que nunca excederá en 50% al valor de la solución óptima, es previsible que sea necesaria aplicar alguna otra estrategia de solución para el problema del TSP. Por tanto, pasamos ahora al apartado 4.6 en el cual revisaremos los fundamentos de la meta-heurística “tabu -search”.

---

<sup>45</sup> Ríos, Roger. (1999), *Aplicaciones del TSP*, “Ingenierías UANL 2(4)”, México, pag 18-23.

<sup>46</sup> Christofides, N. (1976), *Worst-case analysis of a new heuristic for the traveling salesman problem*, "Report 388: Graduate School of Industrial Administration", Carnegie-Mellon University, Pittsburgh EUA, pag 10-12.

#### 4.6 Revisión de la meta-heurística “tabu-search” para la solución del TSP.

A continuación hablaremos de una de las metaheurísticas revisadas provenientes de investigaciones previas relacionadas con la solución del TSP. En principio, las metaheurísticas tiene su origen como métodos de aproximación para atacar particularmente problemas NP-Hard para los cuales las heurísticas de propósito especial, revisadas en el apartado anterior, han fracasado en dar resultados efectivos. Prueba de lo anterior puede ser verificado a partir del valor  $c^*$  calculado para la heurística de Christofides expuesto en el apartado 4.5.

Las meta-heurísticas proporcionan marcos generales que permiten generar enfoques híbridos para la solución de los problemas NP-Hard. La aplicación de los Algoritmos Genéticos para el problema del TSP será tratada de manera extensa en el capítulo 5 puesto que la propuesta doctoral se apoya en esta técnica. En este momento revisaremos las propuestas desarrolladas por otros trabajos de investigación en lo referente a la aplicación de la meta-heurística “Búsqueda Tabú”.

Los orígenes de la búsqueda tabú se ubican a fines de los 60s y principios de los 70s, y se atribuyen a Fred Glover. La búsqueda Tabú o también (Tabu Search), está basada en el psicoanálisis freudiano y surgió como un dispositivo que permitiría implementar una estrategia para resolver problemas de optimización combinatoria. La búsqueda tabú puede verse como una meta-heurística que se superpone o combina con cualquier otro mecanismo de búsqueda. La contribución esencial de la “Búsqueda Tabú” es evitar que el proceso de búsqueda al cual está apoyando, quede atrapado en un óptimo local a través de mecanismos de prohibición (o penalización) de ciertos movimientos<sup>47</sup>.

El propósito de clasificar los movimientos como prohibidos (o “tabú”) es para evitar que se caiga en ciclos durante el proceso de búsqueda. Los movimientos que se consideran prohibidos constituyen generalmente una pequeña fracción del total de movimientos disponibles, y un movimiento pierde su status de prohibido después de un período de tiempo relativamente corto, volviéndose después nuevamente accesible.

Así pues, desde la perspectiva proveniente del psicoanálisis freudiano, la búsqueda tabú trata de emular el comportamiento de una persona. Es bien sabido que los humanos poseemos un avanzado mecanismo

---

<sup>47</sup> Glover, Fred. (1990), *Tabu Search: A Tutorial*, “Interfaces, Vol 20, No. 4”, EUA, pag 74-94.



de intuición que nos permite operar a la vez con información mínima o también cuando la cantidad de datos es muy extensa. Indistintamente solemos introducir un elemento probabilístico en las decisiones que tomamos, lo cual promueve un cierto nivel de "inconsistencia" en nuestro comportamiento. La tendencia resultante en estos casos suele desviarnos de una cierta trayectoria preestablecida, lo cual algunas veces puede ser una fuente de errores, pero en otras ocasiones puede llevarnos a una solución mejor. La búsqueda tabú intenta emular este mecanismo fundamental de la ingenuidad humana.

La Búsqueda Tabú, mantiene información referente a los movimientos más recientes a fin de evitar que una cierta trayectoria *previamente* recorrida se repita. Para lograr lo anterior se apoya en 3 fundamentos principales <sup>48</sup>:

1. El uso de estructuras de memoria, diseñadas para permitir una mejor explotación de los criterios de evaluación y búsqueda histórica.
2. Un mecanismo de control para emplear las estructuras de memoria, basado en la interacción entre las condiciones que limitan o flexibilizan el proceso de búsqueda. Este mecanismo se encuentra inmerso en la técnica en forma de reglas que permiten que un movimiento pierda su status de "tabú" debido a que proporciona una mejor solución que la actual.
3. La incorporación de memorias de diferente duración (de corto a largo plazo), para implementar estrategias que *intensifiquen* (refuercen) las combinaciones que han demostrado históricamente ser buenas; pero también por el otro lado, permitan diversificar la búsqueda hacia nuevas regiones del espacio de soluciones factibles.

Estos dos últimos mecanismos son muy similares a la cruce y la mutación que más adelante se revisarán en el caso de la meta-heurística basada en los Algoritmos Genéticos. El primero nos permite delimitar una cierta región del espacio de búsqueda, mientras que el segundo nos permite saltar a nuevas regiones del mismo, evitando que quedemos atrapados en un óptimo local.

Las estructuras de memoria en la Búsqueda Tabú constituyen una forma de exploración cuyo objetivo es realizar el mejor movimiento posible sujeto a las restricciones que evitan repetir aquellos movimientos que ya han sido revisados (por ser "prohibidos"). El objetivo primordial de los movimientos prohibidos es hacer que la técnica de búsqueda pueda ir más allá de los puntos de

---

<sup>48</sup> Glover, Fred. (1993), *A user's guide to tabu search*, "Annals of Operations Research, Vol. 41", EUA, pag 3-28.

optimalidad local. En general, las restricciones Tabú tienen como objetivo prevenir ciclos e inducir a la búsqueda a que siga una nueva trayectoria.

Algorítmicamente hablando, la Búsqueda Tabú, inicia desde una solución arbitraria. A continuación, el procedimiento se enfoca en la exploración de una vecindad previamente definida para cada punto del espacio solución y elige una nueva solución dentro de tal vecindad, la cual en todo momento busca mejorar el valor que se tiene actualmente como la mejor solución encontrada. El algoritmo concluye una vez que se alcanza una solución tal que es la mejor dentro de la vecindad predefinida a ser explorada. A esta solución alcanzada dentro de la vecindad se le denomina “mínimo local”. Es relevante mencionar que solo en pocas ocasiones, este mínimo local será la solución óptima global del problema. De hecho resulta muy probable que esta solución a la cual se arriba mediante el algoritmo antes descrito quede lejos de la solución óptima global del problema. El funcionamiento básico se ilustra detalladamente en la Figura 4.3 en la siguiente página.

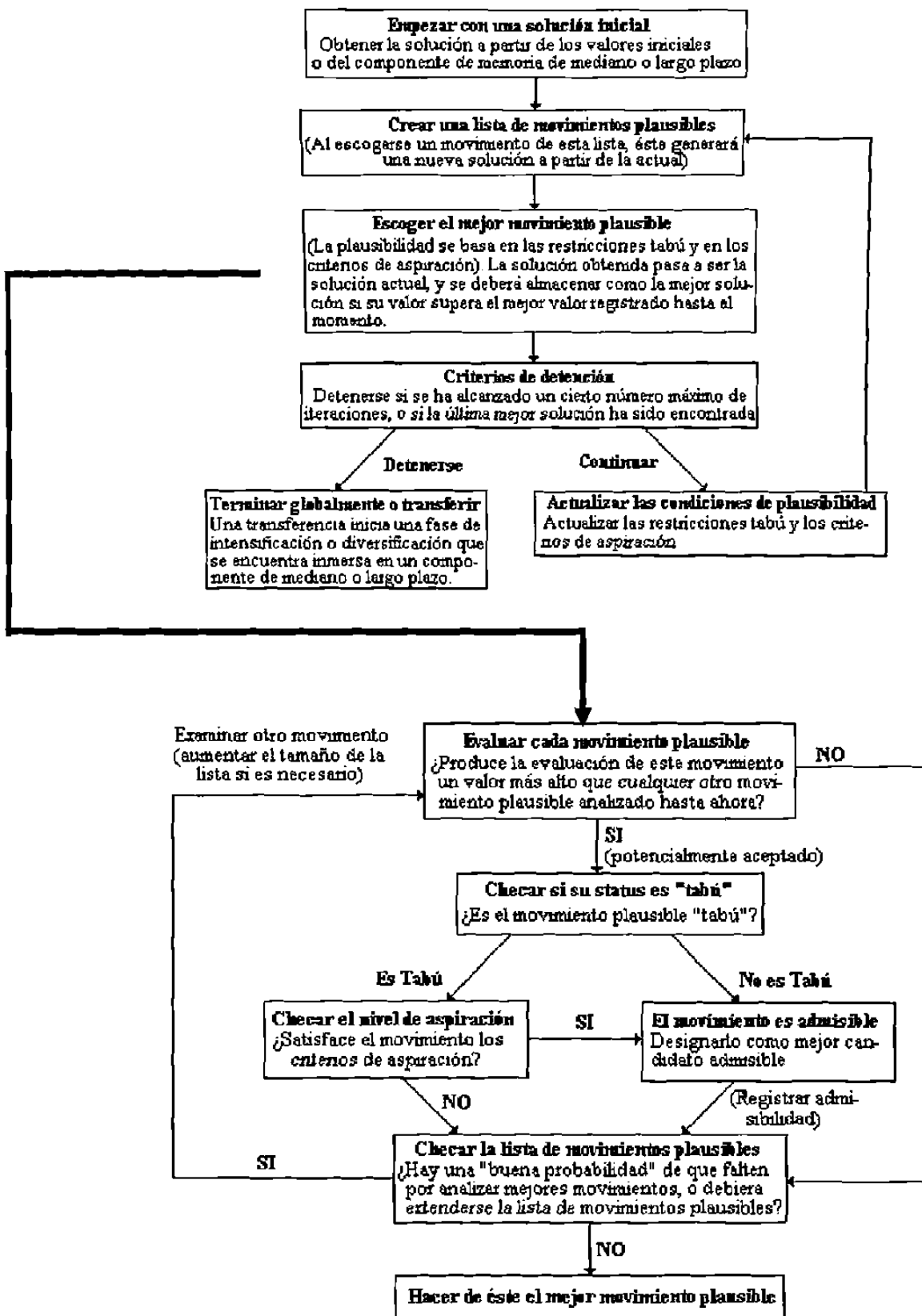


Figura 4.3 Diagrama de flujo del algoritmo basado en la "búsqueda tabú"<sup>49</sup>

<sup>49</sup> Laguna, Manuel. (1994), *A guide to implementing Tabu Search*, "Technical Report, Graduate School of Business, University of Colorado", Boulder Colorado, pag 78.

Particularmente para la solución del TSP, ha habido investigación a través del uso de la búsqueda Tabú, propuesto por Fred Glover en 1986 <sup>50</sup>. Para el caso particular del TSP, un método de búsqueda local sencilla que normalmente ha empleado Tabu Search, es el llamado “k2-opt”. Este procedimiento consiste en eliminar del tour un par de arcos que no sean adyacentes, y reemplazarlas con el único par de arcos con el cual se puede formar nuevamente el tour de manera completo. Este procedimiento se ilustra a continuación en la Figura 4.4.

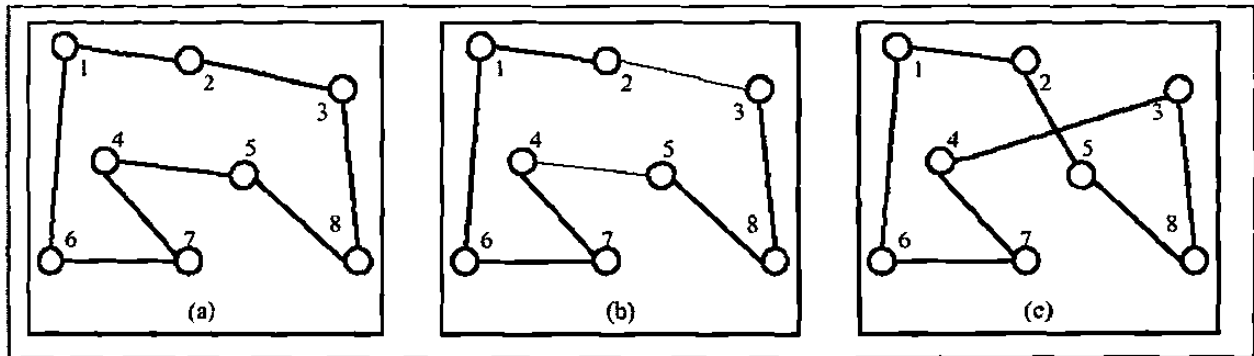


Figura 4.4 (a) Solución inicial; (b) Eliminación de dos arcos: (2,3) y (5,4);  
(c) Nuevo tour sustituyendo con los arcos (2,5) y (3,4)

La meta-heurística Tabú, una vez que converge en un óptimo local, de manera alternativa, puede guiar el procedimiento de búsqueda para continuar más allá de los óptimos locales, esto quiere decir, que al no poder seguir mejorando la solución, se permite tomar otra solución aún cuando el valor no mejore, sino inclusive se degrade, esto último con la finalidad de intentar salir del óptimo local encontrado. No obstante, también existe el riesgo de caer en un ciclo, en el cual se mejora y luego se empeora la solución. Para evitar esto último, se emplea una estrategia que modifica las vecindades a ser exploradas a medida que la búsqueda avanza.

Para lograr que el algoritmo Tabú amplíe las vecindades a ser exploradas, se hace valer de unas estructuras de memoria para determinar esta vecindad modificada y así “recordar” cuales vecindades ya fueron exploradas y evitar volver a aplicar recursos computacionales en su procesamiento innecesariamente. Por ejemplo en el caso del TSP, a partir de una solución particular, una vez suprimido un par de arcos dentro del tour, estos dos arcos no pueden volver a formar parte del tour por

<sup>50</sup> Glover, Fred. (1986), *Future paths for integer programming and links to artificial intelligence*, "Computers and Operations Research", EUA, pag 533-549.

un determinado número de iteraciones, este número de iteraciones se conoce como la permanencia tabú y es parte componente de la parametrización del algoritmo.

Análogamente, cuando un par de arcos se insertan en un tour, no podrán ser suprimidos durante un cierto número de iteraciones. Si la permanencia tabú se elige de manera adecuada, la búsqueda podrá continuar más allá de los óptimos locales sin caer en ciclos de mejoramiento y empeoramiento y así eventualmente alcanzar, si no el óptimo global del problema, sí soluciones que estén cerca de él. Es precisamente esta propiedad para evitar caer en óptimos locales, lo que ha ocasionado que “Tabu Search” tenga relevancia en el ámbito de las “meta-heurísticas” que han sido aplicadas para la solución del TSP.

Por la misma razón anterior, el postulante consideró que era importante mencionar los fundamentos del “Tabu Search” ya que bien podría haber sido otro método propuesto para atender el proyecto de investigación referido a nuestro problema de ruteo de distribución logístico.

#### 4.7 Revisión del método basado en programación dinámica para la solución del TSP.

La programación dinámica es una técnica matemática de optimización que adolece de un problema denominado "dimensionalidad". El asunto de la "dimensionalidad" tiene que ver con la capacidad que un algoritmo tiene para mantenerse estable aún en situaciones en donde los espacios de búsqueda son muy grandes. Richard Bellman desarrolló en los años 50s las ideas básicas de la programación dinámica, postulando el principio de optimalidad el cual afirma:

*"Una política óptima tiene la propiedad de que cualquiera que sean su estado y decisión iniciales, las decisiones subsecuentes deben constituir una política óptima con respecto al estado resultante de la decisión inicial."*<sup>51</sup>

Matemáticamente el principio de optimalidad en la programación dinámica se puede expresarse como:

$$f_n(S_n) = \max_d [R_n(S_n, d_n) + f_{n-1}(S_{n-1})]$$

$n$ =número de etapas subsecuentes en el proceso

$S_n$ =variable de entrada a la  $n$ -ésima etapa

$d_n$ =variable de decisión en la  $n$ -ésima etapa

$f_n(S_n)$ =retorno máximo de un proceso con  $n$  etapas y entradas  $S_n$  en la  $n$ -ésima etapa

$r_n=R_n(S_n, d_n)$ =función de retorno de la etapa  $n$  con entrada  $S_n$  y variable de decisión  $d_n$

$S_{n-1}$ =salida de la etapa  $n$  y entrada a la etapa  $n-1$

$f_{n-1}(S_{n-1})$ =función de retorno máximo desde las etapas 1 a la  $n-1$

Esta ecuación puede interpretarse de la siguiente manera: cada componente de una estructura en serie influye en todas las componentes que le siguen, y como sólo el último componente es independiente, entonces puede ser suboptimizado de manera independientemente en cada etapa. Este proceso se continúa hasta que todo el problema haya sido optimizado. Luego entonces, el número de variables de entrada en cada etapa pueden llegar a incrementarse tanto que las limitantes computacionales se vuelven sumamente serias debido naturalmente a la explosión combinatoria que ya antes hemos venido hablando. A este problema Bellman lo bautizó como la "maldición de la dimensionalidad".

---

<sup>51</sup> Bellman, Richard. (1957), *Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton Nueva Jersey, pag 83.

#### 4.8 Revisión de métodos basados en ramificación y corte (Branch-Cut) para la solución del TSP.

La técnica de ramificación y corte fue mencionada en el apartado 4.4 como un método para resolver problemas combinatorios en términos de la solución exacta. A continuación se enumeran algunas de las investigaciones relacionadas con estrategias basadas en métodos de ramificación y corte (branch & cut) que actualmente se han desarrollado para los problemas combinatorios del tipo TSP.

1. MIP-CUT: la identificación y formulación de los cortes mínimos necesarios sigue siendo parte del estado del arte. Esta estrategia tiene la finalidad de lograr incluir las restricciones necesarias para eliminar los subtours que van quedando a partir del planteamiento del problema de asignación. Como referencias significativas tenemos a Jünger, Rinaldi and Thienel<sup>52</sup>.
2. CONCORDE: El algoritmo fue desarrollado por Applegate, Bixby, Chvátal y Cook sobre una plataforma en código de programación ANSI C. Incluye una fase de heurística de preproceso y algunos algoritmos generales para solución de redes. Las principales heurísticas del algoritmo de pre-proceso son la Heurística de Lin-Kernighan, Heurísticas del tipo k-opt y Búsqueda Miope (Greedy) sobre la Vecindad más próxima<sup>53</sup>.
3. TSP1: Desarrollado por Volgenant y Van Den Hout en código de programación Turbo Pascal. El Algoritmo implementa estrategias de árbol "1-tree". Incluye además una heurística mejorada basada en el algoritmo general de Christofides con algunas restricciones de ruteo tipo "3-opt"<sup>54</sup>.
4. TSP\*: Desarrollado por Lee y basado en el algoritmo general de Christofides. Incluye algoritmos para la generación de cortes mínimos. El algoritmo está desarrollado en el ambiente de programación matemática AMPL<sup>55</sup>.

---

<sup>52</sup> Jünger, M; Rinaldi, G; Thienel, S. (2000), *Practical performance of efficient minimum cut algorithms*, "Algorithmica No. 26", Dinamarca, pag 172-195. Disponible en [http://www.informatik.uni-koeln.de/ls\\_juenger/projects/mincut.html](http://www.informatik.uni-koeln.de/ls_juenger/projects/mincut.html).

<sup>53</sup> Applegate, D; Bixby, R; Chvátal, V; (1998), *On the solution of traveling salesman problems*. "Documenta Mathematica Extra Volume ICM III", EUA, pag 645-656. Disponible en <http://www.math.princeton.edu/tsp/concorde.html>.

<sup>54</sup> Jonker, R; Volgenant, T. (1982), *A branch and bound algorithm for the symmetric traveling salesman problem*, "European Journal of Operational Research, No. 2", Dinamarca, pag 83-89. En <http://www.mathematik.uni-kl.de/ORSEP/contents.html>.

<sup>55</sup> Lee, R. (1976), *Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem*, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh PA. Disponible en <http://www.ms.uky.edu/~jlee/jlsup/jlsup.html>.

5. COMBINATORICA: Desarrollado por Skiena en el ambiente de desarrollo de programación del paquete "Mathematica". Básicamente se utiliza para la generación de las fronteras inferior y superior del espacio solución <sup>56</sup>.
6. ABACUS: Existen dos desarrollos, uno en el ambiente de programación "CPLEX" y el otro en "XPRESS". Se trata de un algoritmo basado en estrategias enumerativas y con código para la generación de cortes mínimos así como para algoritmos para generación incremental de columnas (variables) <sup>57</sup>.
7. MINTO: Desarrollo en el ambiente de programación "CPLEX". El algoritmo está fundamentado en la generación de cortes mínimos y estrategias de ramificación a nivel de cada nodo del árbol de búsqueda <sup>58</sup>.

Es importante precisar que la exposición detallada de dicha técnica será desarrollada más adelante en el apartado 8.2. La razón de lo anterior, es debido a que la aplicación de dicha técnica será de vital importancia para el proyecto de investigación en lo que concierne al diseño experimental.

---

<sup>56</sup> Skiena, S. (1990), *Implementing Discrete Mathematics: Combinatorics and Graph Theory in Mathematica*, Addison-Wesley, Redwood CA. Disponible en <ftp://ftp.cs.sunysb.edu/pub/Combinatorica/>

<sup>57</sup> Disponible en <http://www.oreas.de>

<sup>58</sup> Disponible en [http://www.isye.gatech.edu/faculty/Martin\\_Savelsbergh/software/](http://www.isye.gatech.edu/faculty/Martin_Savelsbergh/software/)



#### 4.9 Comentarios finales: resumen esquemático y otras variantes del TSP.

A continuación en la Tabla 4.2 se muestran esquemáticamente los métodos propuestos para la solución del TSP que han sido discutidos en los apartados 4.4 al 4.8.

Tabla 4.2 Resumen esquemático de los métodos propuestos para la solución del TSP.

| CLASE                           | Método   | Estrategia de Solución   | Implementación  | Investigadores                      | Referencia Bibliográfica   |
|---------------------------------|--|--|---|-------------------------------------|--|
| Heurísticas de Aproximación     |  |  | TSP: lenguaje de modelación matemático AMPL                   | N. Christofides                     | Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem. Graduate School of Industrial Administration, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA, 1976. <a href="http://www.ms.uky.edu/~jlee/jlap/jlap.html">http://www.ms.uky.edu/~jlee/jlap/jlap.html</a>                          |
| Solución Exacta                 | Mixed Integer Programming  | Sub-tour elimination constraints   | CDT: desarrollado en FORTRAN 77                               | Carpaneto, Dell'Amico and Toth      | Solution of large-scale asymmetric traveling salesman problems. ACM Transactions on Mathematical Software, 21:394-409, 1995. <a href="http://www.acm.org/calgo/content/">http://www.acm.org/calgo/content/</a>   |
| Solución Exacta y Heurísticas   |  | El Algoritmo implementa la estrategia "1-tree". Incluye además una heurística mejorada basada en el algoritmo general de Christofides con algunas restricciones de ruteo tipo "3-opt".                   | TSP1: desarrollado en Turbo Pascal                            | Volgenant and van den Hoest         | A branch and bound algorithm for the symmetric traveling salesman problem based on the 1-tree relaxation. European Journal of Operational Research, 9:83-89, 1982. <a href="http://www.mathematik.uni-kl.de/~www/WWWUORSEP/content.html">http://www.mathematik.uni-kl.de/~www/WWWUORSEP/content.html</a> |
| Solución Exacta                 | Mixed Integer Programming  | Generación de Cortes (Hiperplanos)   | MIP-CUT   | Jünger, Rinaldi and Thiele          | Practical performance of efficient minimum cut algorithms. Algorithmica, 26:172-195, 2000. <a href="http://www.informatik.uni-koeln.de/ls_juergen/projects/mipcut.html">http://www.informatik.uni-koeln.de/ls_juergen/projects/mipcut.html</a>   |
| Heurísticas de Aproximación     | Fase de heurística de preproceso y algoritmos generales para solución de redes.                    | Heurística de Lin-Kernighan; Heurísticas del tipo k-opt (para k = 2,3); Búsqueda Greedy; Vecino más próximo.   | Concorde: codificado en C++                                   | Applegate, Bixby, Chvátal y Cook    | On the solution of TSP. Documenta Mathematica, Extra Volume ICM III:645-656, 1998. <a href="http://www.math.princeton.edu/tsp/concorde.html">http://www.math.princeton.edu/tsp/concorde.html</a>   |
| Solución Exacta                 | Mixed Integer Programming  | Algoritmo basado en estrategias enumerativas y con código para la generación de cortes mínimos así como para agregar columnas (variables) incrementales.   | MINTO: codificado en CPLEX / OSL / XPRESS                     | Martin Savelsbergh                  | Savelsberg, M. (1995), Local search in Routing Problem with Time Windows, Annals of Operations Research, Rotterdam Holanda. <a href="http://www.isye.gatech.edu/faculty/">http://www.isye.gatech.edu/faculty/</a>  |
| Heurísticas de Aproximación     | Las heurísticas están basadas en métodos de inserción 2-opt y 3-opt respectivamente.               |  | Desarrollado en Turbo Pascal                                  | Syso, Deo and Kowalik               | Discrete Optimization Algorithms with Pascal Programs. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1983. <a href="http://www.mathematik.uni-kl.de/~www/WWWUORSEP/content.html">http://www.mathematik.uni-kl.de/~www/WWWUORSEP/content.html</a>  |
| Solución Exacta                 | Basado en algoritmos de Programación Dinámica  |  | DYNOPT: Desarrollado en ANSIC                                 | Belas y Simonetti                   | INFORMS Journal on Computing, 13:56-75, 2001. <a href="http://www.andrew.cmu.edu/~neils/tsp/">http://www.andrew.cmu.edu/~neils/tsp/</a>  |
| Heurísticas de Aproximación     | Heurística general de Lin-Kernighan  |  | LKH: desarrollado en ANSIC                                    | S. Lin y B.W. Kernighan             | An effective implementation of the lin-kernighan traveling salesman heuristic. European Journal of Operational Research, 128:106-130, 2000.  |
| Metaheurísticas de aproximación | Algoritmo basado en métodos de búsqueda local dirigida y GRASP                                     |  | GLSTSP: codificado en C++ code                                | C. Voudouris y E. Tsang             | Guided local search and its application to the travelling salesman problem. European Journal of Operational Research, 113:469-499, 1999. <a href="http://www.labs.bt.com/people/voudouris/downloads.htm">http://www.labs.bt.com/people/voudouris/downloads.htm</a>                                       |
| Metaheurísticas de aproximación | La propuesta combina el uso de Algoritmos Genéticos y de técnicas de Búsqueda Tabu (Búsqueda Tabu) |  | TSPGA: codificado en ANSIC code                               | A. Frick                            | An evolution program for the symmetric traveling salesman problem. In H.J. Zimmermann, editor, EUFIT'98 - 6th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing, Mainz Verlag, Aachen, 1998. <a href="http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~u63">http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~u63</a>          |
| Metaheurísticas de aproximación | Implementación basada en Sistemas de Colonización de Hormigas (Ant Colony Systems)                 |  | OR2: codificado en el lenguaje de modelación Mathematica code | No disponible                       | Disponible en: <a href="http://www.softas.de/products.html">http://www.softas.de/products.html</a>   |
| Metaheurísticas de aproximación | Implementación basada en Algoritmos de Recocido Simulado (Simulated Annealing)                     |  | RA-TSP: codificado en CPLEX 6.0 code                          | V. Mak y N. Boland                  | Heuristic approaches to asymmetric travelling salesman problems with replenishment arcs. International Transactions in Operational Research, 7:431-447, 2000. <a href="http://www.ms.unimelb.edu.au/~vmak">http://www.ms.unimelb.edu.au/~vmak</a>  |
| Solución Exacta                 | Mixed Integer Programming  | Algoritmos orientados a la solución de problemas del tipo TSP con restricciones de precedencia especialmente las variantes relacionadas con restricciones de Ventanas de Horario (Time Window). (TSP/TW) | ASCHEUER'S Codes  | Ascheuer, N; Jünger, M; Reinelt, G. | A branch & cut algorithm for the asymmetric Traveling Salesman Problem with precedences constraints. "Computational Optimization and Applications 17(1)", 2000, EUA. <a href="http://www.zib.de/ascheuer">http://www.zib.de/ascheuer</a>   |
| Solución Exacta                 | Mixed Integer Programming  | Algoritmo basado en las estrategias generales del método "Branch-and-cut" y programación MIP. Fuertemente orientado a la solución de problemas del tipo VRP (Vehicle routing problems)                   | SYMPHONY: codificado en ANSIC code                            | Ralphs D.                           | Disponible en <a href="http://www.branchandcut.org/">http://www.branchandcut.org/</a>  |
| Solución Exacta                 | Constraint Programming (CP)  | Método basado en técnicas de explotación restricciones aplicado a problemas de optimización discreta. Mayormente aplicado en problemas del TSP en donde se involucran restricciones de contigüidad.      | Desarrollados codificados en C++ code                         | Focacci, Lodi, Milano               | Disponible en <a href="http://www.or.deis.unibo.it/research_pages/Orcodes">http://www.or.deis.unibo.it/research_pages/Orcodes</a>  |

El proyecto de investigación se sitúa en la aplicación del TSP pero para un problema de logística de distribución de mercancía a los clientes. Para este problema existen diversas variantes, una de éstas corresponde a la necesidad de algunas empresas para ejecutar dicha distribución sobre la base de esquemas de tiempos o ventanas de servicio específicos de acuerdo a las necesidades de cada uno de los clientes. Adicionalmente, un esquema común a encontrar es que la empresa disponga de un almacén central, en el cual se concentran los productos a distribuir. A partir de este almacén central se disponen unidades de transporte que se encargan de visitar a los clientes para hacer la entrega de la mercancía.

Como se puede comprender, es de esperar que las unidades de transporte sean un recurso limitado. De no ser así, pues entonces la forma en la que se podría efectuar el ruteo y la entrega de las mercancías en el menor tiempo posible, sería sobre el criterio de enviar un equipo de transporte de manera individual a cada uno de los clientes. Por tanto, lo más realista sería pensar que no se tienen tantos equipos de transporte como clientes, ya que esto resultaría sumamente costoso. Si acaso vamos al otro extremo, el caso ideal sería si la empresa dispusiera de un solo equipo de transporte para la distribución completa hacia todo el universo de clientes. En este último caso, el problema de determinar la ruta que debe de seguir el vehículo para entregar en el menor tiempo (o en la menor distancia) toda la mercancía es precisamente el TSP en su versión primordial.

No hay duda de que el escenario anterior contribuiría a que el costo fijo se reduzca drásticamente. No obstante, en la práctica puede volverse inoperante sobre la base de restricciones de tiempo y de capacidades en la distribución física. Por tanto aquí hay dos problemas en los que se tiene que pensar. En primer lugar, puede ser que el tiempo mínimo que resulte a partir de una ruta única resulte demasiado largo, lo cual en el mejor de los casos, solo ocasionaría que a algunos clientes les sea entregada la mercancía en un tiempo muy lejos de lo que ellos buscarían tener como nivel de servicio.

Por otro lado, los equipos de transporte pueden tener una cierta capacidad de carga, y por tanto sería entonces necesario que se ocupen varios equipos para poder ejecutar la distribución física de toda la mercancía que deba de ser entregada.

Puede entonces verificarse que este problema contiene dentro de sí otras consideraciones adicionales:

1. Cuántas rutas se requieren para tener un tamaño ideal de la flota de equipo de transporte.
2. Cuáles son los clientes que deben ser asignados a cada una de las rutas para hacer la entrega física.
- 3.Cuál es la ruta que debe de seguir cada uno de los equipos con la finalidad de ejecutar el reparto en el menor tiempo o distancia posible.

A lo ya antes dicho, es relevante agregar que estos tres problemas antes descritos no son independientes, sino que la solución de uno determina la del otro. Este problema se conoce como el problema de ruteo de vehículos o también denominado (VRP, *Vehicle Routing Problem*). A manera de describir un ejemplo, la Figura 4.5 muestra un ruteo factible para una instancia del VRP con una central de abasto, ocho puntos de entrega y tres unidades de distribución. En dicha figura, se puede verificar que cada una de las tres unidades de distribución corresponde a un sub-tour cerrado.

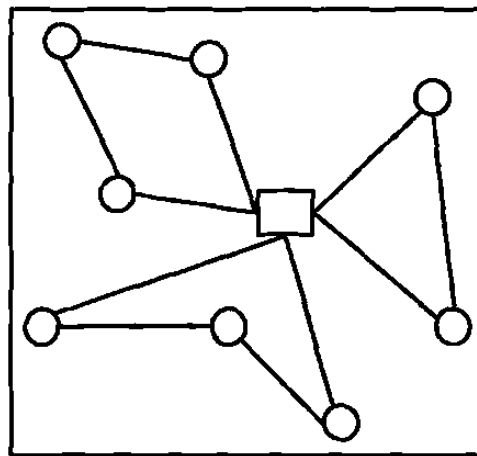


Figura 4.5 Ejemplo de un ruteo factible en un VRP  
(una central de abasto, ocho clientes y tres unidades de distribución)

Finalizamos resaltando el objetivo que el postulante buscó cubrir en el presente capítulo. El problema del TSP así como nuestro problema de investigación de ruteo logístico, son problemas “NP-Hard” para los cuales las meta-heurísticas previsiblemente ofrecen buenas estrategias de solución. Las referencias expuestas en el tema de “Tabu Search” así lo exponen.

En el siguiente capítulo 5 será desarrollado el fundamento de la meta-heurística basada en los Algoritmos Genéticos. Más adelante en el capítulo 6 se hará el planteamiento formal del problema de investigación así como la exposición de los trabajos de investigación previos para el problema en

cuestión. Será en ese capítulo 6 en el cual resultará notable la ausencia relativa de la aplicación de un Algoritmo Genético como estrategia de solución para el problema planteado. La motivación del postulante para seleccionar esta meta-heurística como propuesta de solución versa precisamente sobre esta ausencia relativa que podrá ser revisada en el capítulo 6 en donde se expone la revisión bibliográfica.

Aunque hasta este momento, el uso de una meta-heurística como propuesta de solución parece ser una estrategia conveniente, es importante revisar las ventajas y desventajas de su aplicación. Por tal motivo en el apartado 5.13 del siguiente capítulo se abordará dicho tema.

Como se puede apreciar, existen varios tipos de características y propiedades que pueden hacer más fácil o difícil la solución matemática y computacional para un problema de ruteo logístico en cuestión. Lo anterior está íntimamente relacionado a la naturaleza NP-Hard de los problemas de ruteo en general. Por el motivo anterior, es importante iniciar ya el capítulo 5 en el cual se hará la exposición acerca de cual será nuestra propuesta de solución para el problema de ruteo de distribución logístico.