

Capítulo 6

Experimentación

Este capítulo muestra la experimentación realizada para validar la implementación de la metodología propuesta en el capítulo 5. Primero se describe el ambiente donde se llevaron a cabo las pruebas del sistema de transportación. Posteriormente se muestran los casos de prueba y su organización en dos formatos: base de datos y archivo de texto plano. Por último se presentan los experimentos realizados y los resultados obtenidos.

6.1 Descripción de la Cama de Prueba

En esta sección se detalla la implementación del Sistema de Transportación desarrollado. También se muestran los elementos que sirvieron de base para la obtención de los casos de prueba y cómo fueron organizados en archivos.

6.1.1 Sistema de Transportación

El Sistema de Transportación desarrollado para resolver casos reales del problema RoSLoP (ver capítulo 2) fue implementado en una embotelladora de productos que por razones de confidencialidad la hemos denominado EMPRO. La Figura 6.1 muestra en forma general su esquema de funcionamiento.

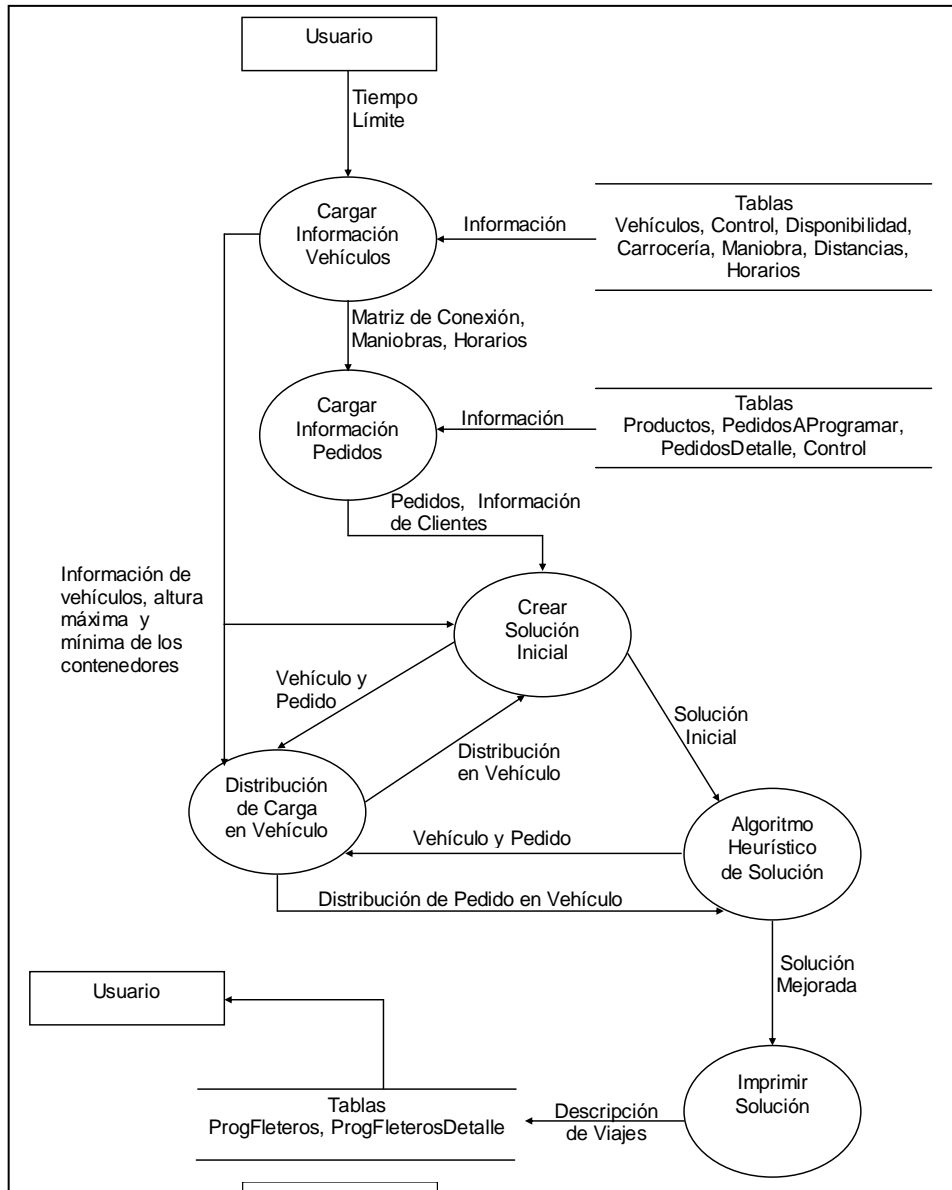


Figura 6.1. Diagrama de Flujo de Transporte que da solución al Problema ROSLOP

Los datos de los casos de entrada se obtienen de una base de datos de EMPRO, la cuál se carga en estructuras de memoria adecuadas para ser procesadas por el Sistema de Transporte. Una vez leído la entrada, se procesa la información de los vehículos y pedidos a través de la heurística del vecino más cercano, que se mejorara posteriormente utilizando el enfoque heurístico del sistema de colonia de hormigas.

El Sistema de Transporte opera dentro de un tiempo límite establecido por el usuario. Una vez que es alcanzada dicha

Información
vehículos, alturas
máxima y
mínima de los
contenedores

Vehículo y
Pedido

Solución
Inicial

condición el sistema termina, almacenando los resultados en tablas dentro de la base de datos.

Para la tarea de enrutamiento, el Sistema de Transportación resuelve BPVRP, el cual incluye las variantes VRPTW, HVRP, VRPM, MDVRP, VRPMTW, CVRP, SDVRP, sdVRP y la nueva restricción de la capacidad de atención en los clientes CCVRP (ver capítulo 2).

6.1.2 Implantación del Sistema de Transportación

En la primera etapa, EMPRO planteó la implantación del Sistema de Transportación en tres regiones. Cada región representa un área de distribución formada por un conjunto de clientes asociado a uno o más almacenes. En la Figura 6.2 se presenta el grafo de conexión de estas regiones.

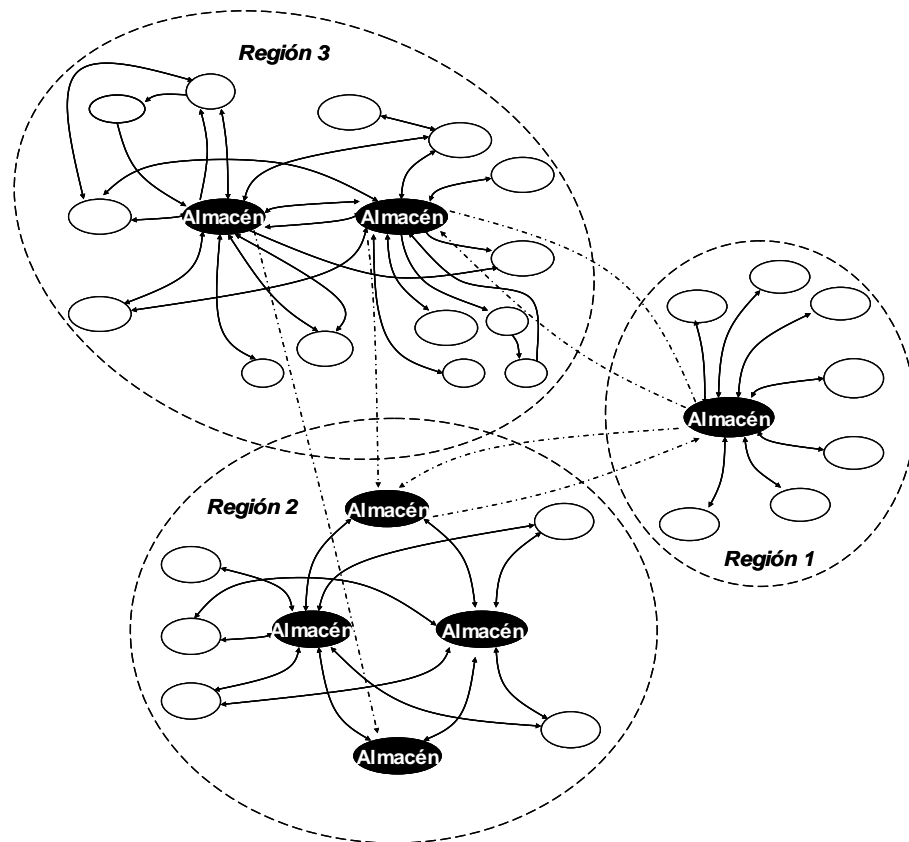


Figura 6.2. Grafo de conexión de las regiones de EMPRO.

En una segunda etapa, la empresa pretende integrar las tres regiones en una más compleja para compartir recursos entre ellas.

Actualmente el Sistema de Transportación únicamente se ha instalado en la región 1. Por esta razón, aún no se cuenta con datos reales confiables de la operación de las otras regiones, así como de los resultados de la transportación que se realiza de manera manual en dichas regiones.

6.1.3 Descripción General de Casos de Prueba y su Complejidad

Los casos de prueba que se usaron para evaluar el Sistema de Transportación desarrollado en esta tesis, corresponden a la Región 1 de la embotelladora de productos EMPRO.

La Figura 6.3 muestra el grafo de conexión de la Región 1 de EMPRO. Como se puede apreciar, la Región 1 presenta el grafo de conexión más sencillo ya que contiene siete clientes enlazados en estrella al único almacén disponible.

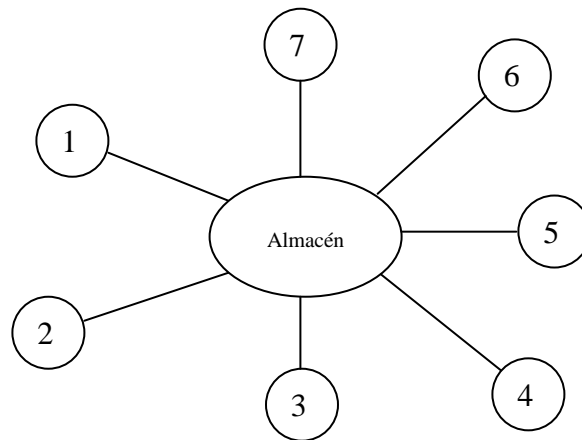


Figura 6.3. Grafo de conexión de la Región 1 EMPRO.

La aparente sencillez de las conexiones de la Región 1 no disminuye su complejidad, ya que, como se verá líneas abajo, sigue involucrando variantes de VRP complejas. Por esta razón, los casos de prueba de la Región 1 (ver Sección 6.2.2) se consideraron suficientes para determinar si el Sistema de Transportación resuelve, de manera eficiente, situaciones complejas del mundo real.

Los elementos básicos dentro de los casos de prueba son: clientes, pedidos, almacenes y vehículos. Los clientes son las localidades que hacen un pedido. Los pedidos representan la demanda de producto a satisfacer por los almacenes. Los almacenes son las localidades que se encargan de satisfacer la demanda hecha por los clientes usando los vehículos disponibles. El conjunto de restricciones que se puede presentar para poder satisfacer las demandas puede ser diferente, dependiendo del caso que se desee resolver. Las restricciones involucradas se dividen en dos clases: restricciones de rutas y restricciones de cargas.

Las restricciones de rutas se refieren a los requisitos que se deben satisfacer en el diseño de las rutas para poder cubrir las demandas de los clientes. Este tipo de limitaciones se puede encontrar tanto para definición y asignación de rutas como para asignación de horarios. El sistema resolvió casos de prueba que incluyeron las siguientes propiedades:

1. La capacidad de los vehículos está limitada (CVRP);
2. Los vehículos tienen una capacidad heterogénea (HVRP);
3. Los vehículos pueden emplearse más de una vez (VRPM);
4. Los clientes tienen un periodo de tiempo en el cual debe ser satisfecha su demanda (VRPTW);
5. Los pedidos pueden exceder las capacidades de los vehículos por lo cual pueden requerir más de un viaje para poder satisfacer sus demandas (SDVRP);
6. Existe un solo almacén (sdVRP); y
7. Los clientes tienen una capacidad limitada para recibir vehículos simultáneamente (CCVRP).

Las restricciones de cargas manifiestan el orden en que deben ser acomodados los productos en un vehículo, se rigen bajo las propiedades de los bienes a abastecer. Estas restricciones son:

1. Los productos agrupados en camas deben ser de la misma área de restos y categoría;
2. Los productos que se agrupan en tarimas deberán tener la misma área de restos;

3. Se debe respetar el peso soportado de los productos;
4. Las tarimas no deberán exceder su altura límite o la altura de los contenedores donde serán ubicadas dentro de los vehículos;
5. Se debe respetar el peso soportado por el vehículo;
6. No se pueden combinar demandas de diferentes clientes;
7. Las tarimas deben ser acomodadas en el vehículo balanceando la carga entre ambos lados del mismo; y
8. Las tarimas más pesadas irán al frente del vehículo mientras las más ligeras estarán en la parte de atrás.

Una descripción más detallada de éstos dos conjuntos de restricciones se puede encontrar en la descripción del problema de transporte de una embotelladora de productos mostrado en la sección 2.4.

6.1.4 Casos de Prueba del Sistema de Transportación

Cada caso de prueba se define con un conjunto parámetros que deben ser proporcionados para su solución.

Para definir los problemas de definición y asignación de rutas y asignación de horarios, los parámetros de la instancia son: número de clientes, número de almacenes, número de vehículos, especificación de los depósitos, clientes y vehículos, demanda de los clientes, capacidad de los vehículos, matriz de conexiones, ventanas de tiempo de los clientes, ventana de tiempo del almacén, ventana de tiempo de los vehículos, tiempos de maniobra de los vehículos, especificación de la dependencia de los clientes, especificación de la dependencia de los vehículos y tipo y número máximos de vehículo que se pueden recibir en los clientes.

Los parámetros del problema de asignación de cargas son: vehículo donde se va a distribuir, demanda a distribuir y propiedades de los productos. El vehículo representa al conjunto de contenedores donde se debe hacer la distribución, mientras que la demanda los objetos que se deben cargar; ambos datos se obtienen como resultado de la transformación

de los parámetros de los problemas de definición y asignación de rutas y asignación de horarios, durante el proceso de búsqueda de solución. Las propiedades de los productos son las características que se necesitan para respetar las restricciones antes mencionadas.

Los parámetros de los casos de prueba son descritos más adelante, en la sección de especificación de parámetros, junto con la base de datos que se requiere para obtener la información de los casos reales.

6.1.5 Obtención de Casos de Prueba

Las entradas (casos de prueba) del Sistema de Transportación, se obtienen procesando las tablas de base de datos proporcionada por la embotelladora de productos. En las tablas se encuentran todos los datos necesarios para generar la instancia que se desea resolver a través del sistema.

La carga a memoria de los parámetros que definen los problemas de definición y asignación de rutas y asignación de horarios se hace desde un archivo plano intermedio entre la base de datos y los datos en memoria. El archivo plano es compatible con los casos estándar de VRP propuestos por la comunidad científica. El propósito de su estructura es que en futuras versiones del sistema éste pueda ser utilizado para resolver instancias de cualquier variante VRP, y contrastar el comportamiento de los algoritmos de solución con el de otras investigaciones. Actualmente, sólo se han resuelto casos estándar de VRPTW.

Los parámetros del problema de asignación de carga se pasan directamente de la base de datos a memoria, sin hacer uso de un archivo intermedio. En las siguientes secciones se describe la estructura de la base de datos utilizada para formar un caso de prueba, y el archivo intermedio para cargar datos al sistema de manera estandarizada.

6.1.5.1 Descripción de la Base de Datos de una Embotelladora

Las tablas empleadas por el Sistema de Transportación provienen de una base de datos que ha sido facilitada por EMPRO, las Figuras 6.4 y 6.5 muestran los diagramas descriptivos.

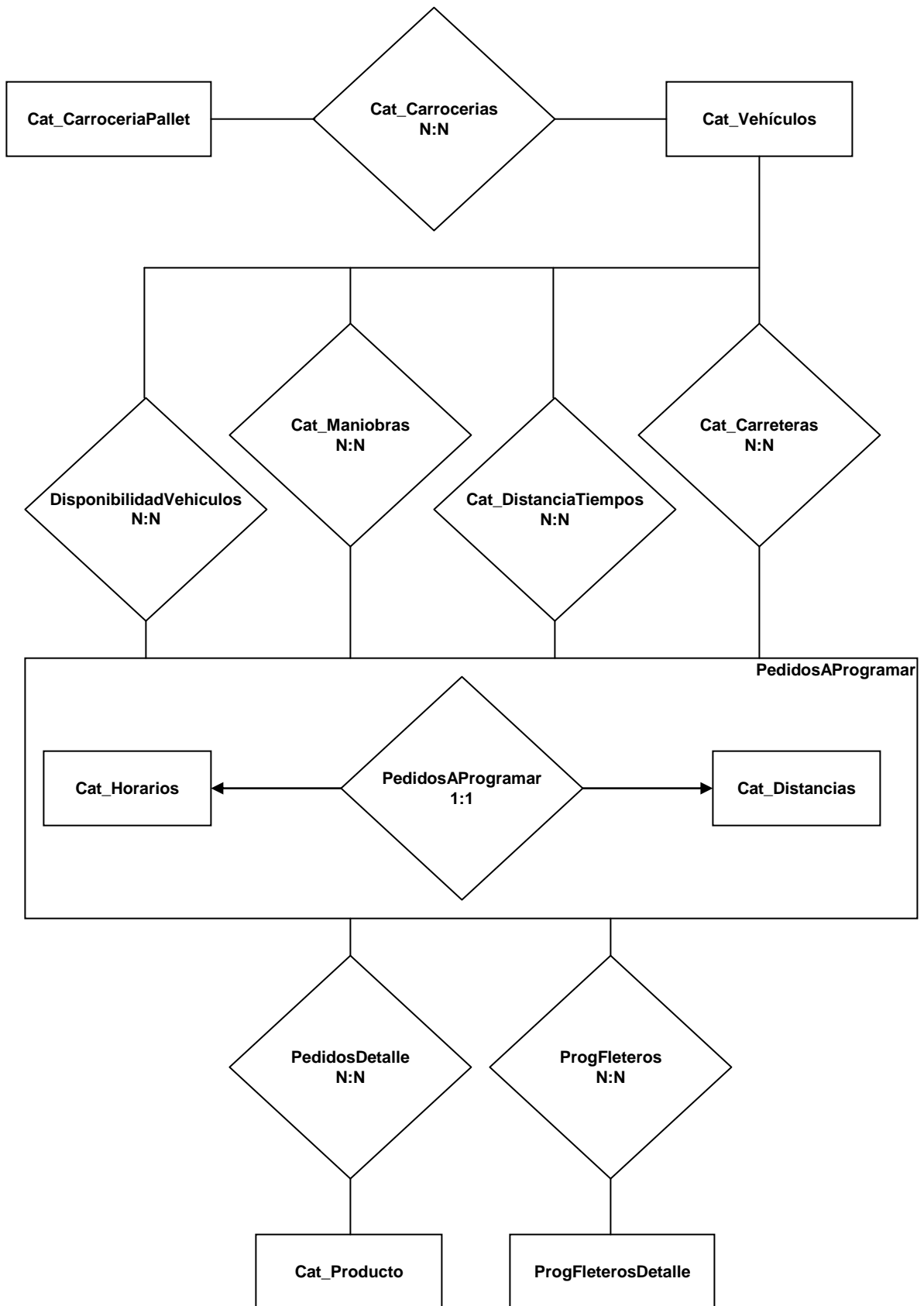


Figura 6.4. Diagrama Entidad – Relación de la Base de Datos EMPRO.

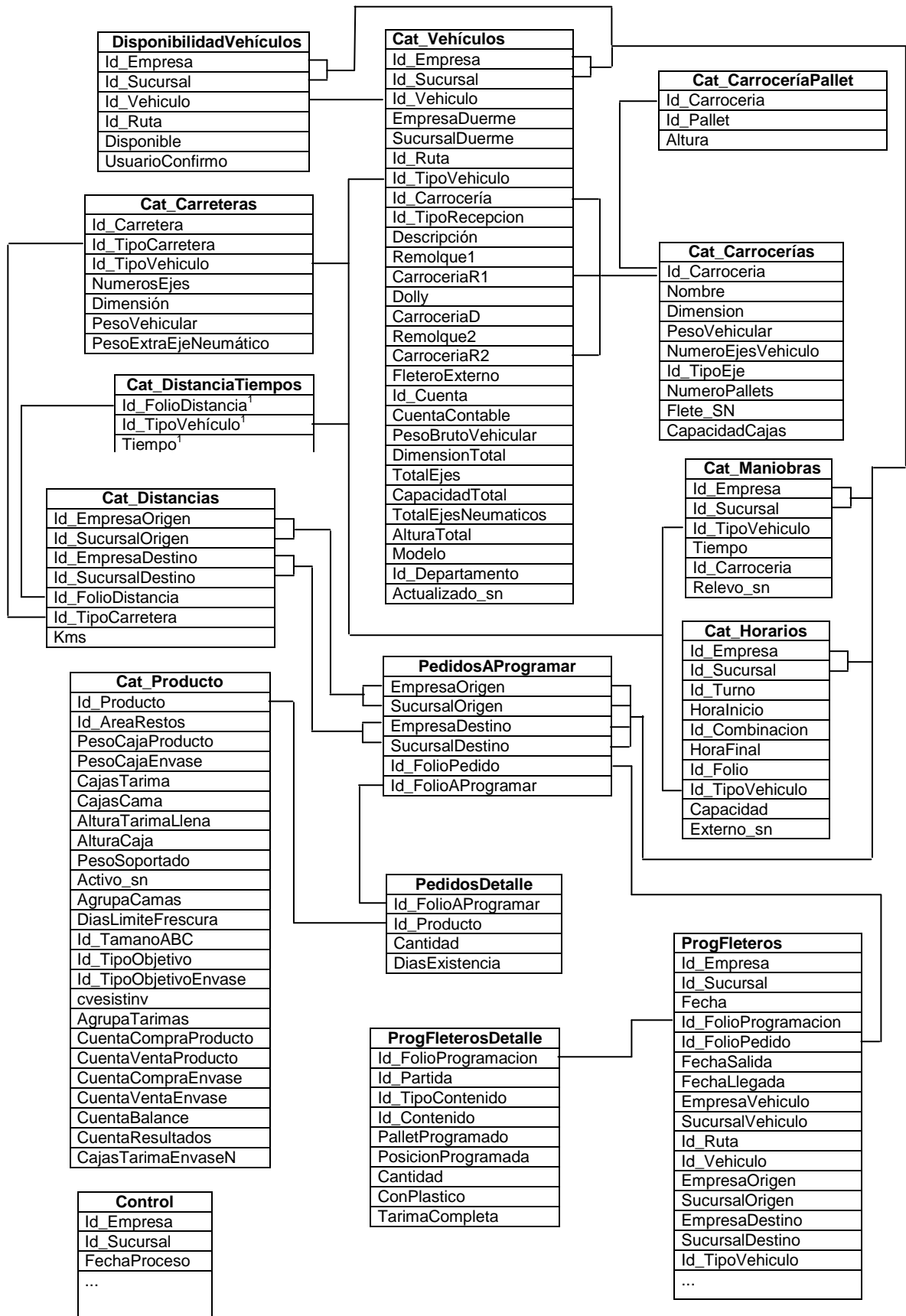


Figura 6.5. Diagrama de Relación de la Base de Datos de EMPRO.

En los siguientes párrafos se describen las tablas necesarias para obtener una instancia RoSLoP, y se indica qué campos participan en la obtención de dicho caso.

La Tabla 6.1 *Cat_Vehículos* muestra información específica referente a la flotilla como: los tipos de contenedores que maneja, el tipo de vehículo, a que compañía pertenece, su peso, entre otros.

Tabla 6.1. *Cat_Vehiculos.*

Campo	Descripción
Id_Empresa ¹	Identifican el almacén al que pertenece la empresa.
Id_Sucursal ¹	
Id_Vehiculo ¹	Es el número de identificación del vehículo.
EmpresaDuerme	
SucursalDuerme	
Id_Ruta	
Id_TipoVehiculo ¹	Identifica de que clase es el vehículo.
Id_Carrocería ¹	Hace referencia al tipo de contenedores que el vehículo posee.
Id_TipoRecepcion	
Descripción	
Remolque1	
CarroceriaR1 ¹	Hace referencia al tipo de contenedores que el vehículo posee.
Dolly	
CarroceriaD	
Remolque2	
CarroceriaR2 ¹	Hace referencia al tipo de contenedores que el vehículo posee.
FleteroExterno ¹	Identifica si el vehículo es de la compañía o no.
Id_Cuenta	
CuentaContable	
PesoBrutoVehicular ¹	Peso total del vehículo.
DimensionTotal	
TotalEjes ¹	Número de ejes que conforman el vehículo.
CapacidadTotal	
TotalEjesNeumaticos ¹	Número de ejes neumáticos que conforman el vehículo.
AlturaTotal	
Modelo	
Id_Departamento	
Actualizado_sn	

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

La Tabla 6.2 *DisponibilidadVehiculos* permite identificar qué vehículos de *Cat_Vehiculos* se pueden emplear para satisfacer las demandas.

Tabla 6.2. *DisponibilidadVehiculos.*

Campo	Descripción
Id_Empresa ¹	Identifican el almacén donde se va a utilizar el vehículo
Id_Sucursal ¹	
Id_Vehiculo ¹	Número único de identificación del vehículo.
Id_Ruta	
Disponible ¹	En este campo se indica con el valor de 1 si el vehículo representado por <i>Id_Vehiculo</i> puede ser empleado en la solución del caso de prueba.
UsuarioConfirмо	

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

La información específica sobre los contenedores de los vehículos se obtiene de las Tablas 6.3 y 6.4 (*Cat_Carrocería* y *Cat_CarroceriaPallet*). La tabla *Cat_Carrocerías* proporciona información sobre el número de contenedores en cada carrocería que se puede asignar al vehículo, los cuales pueden tener a lo más tres tipos de carrocerías diferentes.

Tabla 6.3. *Cat_Carrocerías*.

Campo	Descripción
Id_Carrocería ¹	Sirve para identificar cada tipo carrocería que puede ser asignado a los camiones.
Nombre	
Dimension	
PesoVehicular	
NumeroEjesVehiculo	
Id_TipoEje	
NumeroPallets	Contiene el total de contenedores de esta carrocería.
Flete_SN	
CapacidadCajas	

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

En la Tabla 6.4 se almacena datos sobre las características de cada contenedor que compone los diferentes tipos de carrocería.

Tabla 6.4. *Cat_CarroceriaPallet*

Campo	Descripción
Id_Carrocería ¹	Sirve para identificar cada tipo carrocería que puede ser asignado a los camiones.
Id_Pallet ¹	Número que identifica un contenedor dentro de una carrocería.
Altura ¹	Es la altura física del contenedor.

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

Para establecer las conexiones entre las ciudades se muestra la Tabla 6.5 *Cat_Distancias*. En esta tabla se muestran las carreteras que unen cada una de las localidades que comprende el caso de prueba a formar. La matriz de conexiones es creada a partir de viajes entre un origen y un destino, los cuales no tienen localidades intermedias por visitar.

Tabla 6.5. *Cat_Distancias*

Campo	Descripción
Id_EmpresaOrigen ¹	Estos dos valores establecen la localidad de origen de un viaje.
Id_SucursalOrigen ¹	
Id_EmpresaDestino ¹	Estos dos valores establecen la localidad de destino de un viaje.
Id_SucursalDestino ¹	
Id_FolioDistancia ¹	Valor numérico identificador de un viaje (origen – destino). Sirve para determinar el costo de la conexión.
Id_TipoCarretera ¹	Clase de carretera por la que se realiza este viaje (A, B, ...).
Kms	

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

Los costos de las conexiones entre localidades se proporcionan en la Tabla 6.6 *Cat_DistanciaTiempos*. Su enlace con la matriz de conexiones especificada en *Cat_Distancias* lo hace el campo *Id_FolioDistancia*.

Tabla 6.6. *Cat_DistanciaTiempos*

Campo	Descripción
Id_FolioDistancia ¹	Valor numérico identificador de un viaje (origen – destino). Sirve para determinar el costo de la conexión en tiempo.
Id_TipoVehículo ¹	Tipo de Vehículo.
Tiempo ¹	Tiempo en que el vehículo de tipo <i>Id_TipoVehículo</i> recorre <i>Id_FolioDistancia</i> .

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

Dentro de la Tabla 6.7 *Cat_Carreteras* se encuentra la descripción de los tipos de carreteras por los cuales se transita para visitar los clientes.

Tabla 6.7. *Cat_Carreteras*.

Campo	Descripción
Id_Carretera ¹	Valor numérico único de carretera. Es el identificador que permite describir la matriz de conexiones de la tabla <i>Cat_Distancias</i> .
Id_TipoCarretera ¹	Clase de carretera construida físicamente para llegar al cliente.
Id_TipoVehículo ¹	Clase de vehículo que puede transitar por esta carretera.
NumerosEjes	
Dimensión	
PesoVehicular ¹	Peso máximo soportado del vehículo de tipo <i>Id_TipoVehículo</i> que circula por una carretera de clase <i>Id_TipoCarretera</i> .
PesoExtraEjeNeumático ¹	Peso que se puede adicionar al peso máximo soportado (PesoVehicular) por cada unidad de eje neumático que lleve el camión.

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

Las ventanas de tiempo de las localidades y su capacidad de atención se proporcionan en la Tabla 6.8 *Cat_Horarios*. El horario de servicio de los vehículos se ajusta al horario de atención del almacén al que cada vehículo pertenece.

Tabla 6.8. *Cat_Horarios*.

Campo	Descripción
Id_Empresa ¹	Estos dos valores establecen a qué empresa se le están asignando las ventanas de tiempo y capacidad de atención.
Id_Sucursal ¹	
Id_Turno ¹	Este campo es necesario para poder incluir diferentes periodos de atención de las localidades (fragmentos de tiempo).
Horainicio ¹	Es la hora en que comienza el turno <i>Id_Turno</i> .
Id_Combinacion	
HoraFinal ¹	Es la hora en que termina el turno <i>Id_Turno</i> .
Id_Folio	
Id_TipoVehículo ¹	Es la clase de vehículo más grande que puede recibir. Los vehículos disponibles cuyo <i>Id_TipoVehículo</i> sea menor a su valor también serán recibidos por el cliente identificado por <i>Id_Empresa</i> y <i>Id_Sucursal</i> .
Capacidad ¹	Es el número de vehículos que se pueden atender en forma simultánea.
Externo_sn	

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

La Tabla 6.9 muestra el tiempo de carga y descarga de los vehículos por localidad.

Tabla 6.9. Cat_Maniobras.

Campo	Descripción
Id_Empresa ¹	Estos dos valores establecen a qué empresa se le están asignando los tiempos de maniobra.
Id_Sucursal ¹	
Id_TipoVehiculo ¹	Los tiempos de maniobra son asignados por cliente que se atiende y tipo de vehículo que lo atiende, este campo es el segundo elemento necesario para establecer los tiempos de maniobra.
Tiempo ¹	Es tiempo de carga y descarga de un vehículo de tipo <i>Id_TipoVehiculo</i> en la localidad identificada por <i>Id_Empresa</i> e <i>Id_Sucursal</i> .
Id_Carroceria	
Relevo_sn	Es la hora en que termina el turno <i>Id_Turno</i> .

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

La Tabla 6.10 contiene las propiedades de los productos que se toman en cuenta para poder hacer la distribución dentro de los contenedores de los vehículos.

Tabla 6.10. Cat_Producto.

Campo	Descripción
Id_Producto ¹	Es el identificador de un producto específico.
Id_AreaRestos ¹	Propiedad: área de restos del producto.
PesoCajaProducto ¹	Es el peso de una caja de producto.
PesoCajaEnvase	
CajasTarima ¹	Es el número de cajas de un producto que se necesitan para formar una tarima homogénea.
CajasCama ¹	Es el número de camas de un producto que se necesitan para formar una cama homogénea.
AlturaTarimaLlena	
AlturaCaja ¹	Altura de la caja de producto
PesoSoportado ¹	Peso soportado por la caja de producto.
Activo_sn	
AgruparCamas ¹	Propiedad: Categoría del producto
DiasLimiteFrescura	
Id_TamanoABC	
Id_TipoObjetivo	
Id_TipoObjetivoEnvase	
cvesistinv	
AgruparTarimas	
CuentaCompraProducto	
CuentaVentaProducto	
CuentaCompraEnvase	
CuentaVentaEnvase	
CuentaBalance	
CuentaResultados	
CajasTarimaEnvaseN	

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

La Tabla 6.11 indica cuáles son los clientes y almacenes del caso de prueba.

Tabla 6.11. PedidosAProgramar.

Campo	Descripción
EmpresaOrigen ¹	Este par representa el almacén que abastecerá este pedido.
SucursalOrigen ¹	
EmpresaDestino ¹	Este par representa el cliente con una demanda a ser satisfecha.
SucursalDestino ¹	
Id_FolioPedido	
Id_FolioAProgramar ¹	Folio de la demanda de cliente especificado en la Tabla 6.12.

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

La Tabla 6.12 especifica (en número de cajas) el pedido de los clientes al almacén.

Tabla 6.12. PedidosDetalle.

Campo	Descripción
Id_FolioAProgramar ¹	Identifica el cliente al que pertenece el pedido en Tabla 6.11.
Id_Producto ¹	Productos que forman parte de este pedido
Cantidad ¹	Cantidad de este producto a surtir.
DiasExistencia	

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

Dentro de la Tabla 6.13 *Control* están las banderas que cambian las condiciones en que se deben resolver las instancias, como por ejemplo que se respeten las restricciones.

Tabla 6.13. Control

Campo	Descripción
Id_Empresa ¹	Estos elementos identifican el almacén que está realizando la programación de los horarios.
Id_Sucursal ¹	
FechaProceso ¹	La fecha donde se va a obtener el caso de prueba a resolver.
FechaMttoSistema	
Id_FolioAlmacen	
Id_FolioPedido	
Id_FolioCompras	
Id_OrdenCompras	
Id_FolioFaltante	
Id_FolioFletero	
EstadoPedidoProducto	
EstadoProgramacionFleteo	
ProgramaFleteoPorPeso ¹	Bandera que indica si se debe existir la restricción de peso.
InventarioFisicoRealizado	
InicioSesion	
VerificacionSalidaRutas	
...	(Campos Innecesarios)
ProductosCompletarCarga	
NormasSCT	
ProgramaTiempovsCarga	
ActualizaCatalogoRemoto	
UsoAreaRestosFleteros	
UsoAreaRestosRutas	
PorcentajeCompletarCarga	
ControlaFrescuraLataMultiproducto	
UsaTarimaVacía	
DistribuyeCarga	
VigilanteUsaTP	
AlturaMaximaTarimaCombinada ¹	Altura máxima para la creación de tarimas mezcladas.
DiasAntesFrescarse	
UsuarioInicioSesion	
FinSalidaRutas	
AlturaMinimaTarimaCombinada ¹	Altura mínima para la creación de tarimas mezcladas.
UsarRestriccionDePeso	
FinSalidaPromotor	
FinSalidaCiel	
TiempoCalculo ¹	Tiempo máximo para buscar la solución.
AlturaTarima ¹	Altura de la tarima de madera donde se colocan las camas de producto para formar las tarimas.
PesoTarima ¹	Peso del tablón de madera donde se coloca el producto.

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

6.1.5.2 Descripción del Archivo Plano de Entrada

El archivo de entrada se encuentra estructurado a través de una serie de etiquetas que concentran la información requerida por el sistema, para la descripción de casos de prueba. El valor asignado a cada etiqueta, proveniente de los casos reales, se obtuvo de la base de datos proporcionada por EMPRO. El cálculo de dichos valores se muestra en el Anexo A de este documento. Las etiquetas son:

VRPTEST {*double*}. Es el identificador del formato. El valor que seguirá a esta etiqueta deberá ser numérico, expresando la versión del formato de la instancia que se está describiendo en el archivo.

NAME: {*string*}. Nombre del problema. Deberá ser una cadena de caracteres y dígitos indicando el nombre de la instancia. Esta cadena deberá ser resultado de una combinación de caracteres alfabéticos, dígitos ó ‘_’. El nombre no deberá exceder los 254 caracteres.

COMMENT: {*string*}. Líneas de comentario utilizadas para aclarar alguna descripción del caso de prueba. Cada línea de comentario no deberá exceder de 254 caracteres.

NUM_VISITS: {*int*}. Es el número de clientes con una demanda a satisfacer. No se deben incluir almacenes que son clientes de otros depósitos.

NUM_DEPOTS: {*int*}. Es el número de almacenes.

NUM_VEHICLES: {*int*}. Es el número máximo de vehículos disponibles.

NUM_LOCATIONS: {*int*}. Es el número de localidades. Se contabiliza sumando el número de clientes más el número de almacenes que intervienen en el caso.

MAX_TIME: {*real*}. Es la longitud máxima (en la unidad de tiempo que se maneje) de un tour (o ruta) simple. En esta sección se puede indicar el tiempo máximo de duración

que puede existir en el periodo de trabajo del caso que manejamos para nuestra variante VRP (p.e. 1 día).

DATA_SECTION. Esta etiqueta separa el área de especificación de datos de la etiqueta de datos.

DEPOTS $\{depot-id\}$... Son los identificadores de los almacenes. En nuestro caso estará representado por los números de nodos que representan depósitos.

DEMAND_SECTION $\{visit-id\}$ $\{quantity-1\}$ $[\{quantity-2\}...]$ -1. Representa las demandas de cada cliente así como la que hacen algunos depósitos a otros depósitos. En esta sección se especifican todas las demandas de los clientes. Más adelante en la etiqueta DEPOT_COMPAT_SECTION se especificará el orden de satisfacción de las demandas por almacén. El número de demandas que aparezca en cada cliente será el mismo que el número de veces que el cliente se repita en la sección DEPOT_COMPAT_SECTION, donde la primera aparición $\{cliente, depot1\}$ indicará que el *depot1* deberá satisfacer la primer demanda que aparezca en esta sección para *cliente*, la siguiente $\{cliente, depot2\}$ hará referencia a la segunda demanda y así sucesivamente. Las demandas son valores de punto flotante y el identificador de la visita es numérico. Deberán aparecer enunciadas todas las localidades (visitas y depots) con sus demandas especificadas, en caso de no tener demanda el valor que seguirá al identificador de la visita será -1.

VEHICLE_CAPACITY_SECTION $\{vehicle-id\}$ $\{capacity-1\}$ $[\{capacity-2\}...]$. En esta sección se muestra de manera explícita la capacidad de los NUM_VEHICLES existentes.

VEHICLE_COST_SECTION $\{vehicle-id\}$ $\{use-cost\}$ $\{distance-cost\}$ $\{time-cost\}$. En esta sección se define el costo de uso de cada vehículo. Para vehículos de la compañía será 1.0, para vehículos externos será un costo que haga que se utilicen sólo cuando ya no existan vehículos de la compañía disponibles. Los parámetros $\{distance-cost\}$ $\{time-cost\}$ toman un valor cualquiera ya que no importan para la variantes VRP consideradas.

EDGE_WEIGHT_SECTION. Es la matriz de adyacencia que indica el costo de viajar de un nodo a otro. El formato en esta sección se modifica puesto que el valor entre nodos dependerá del vehículo que se esté usando. Es una matriz simétrica puesto que representa lo mismo viajar de i a j que de j a i . Los valores son positivos.

TIME_WINDOW_SECTION $\{visit-id\} \{early-1\} \{late-1\} \dots -1$. Indica las ventanas de tiempo disponibles para todos los clientes. En esta sección se expresarán los turnos de servicio a los vehículos para que hagan operaciones de maniobra. Aquí solamente se incluirán clientes. Las ventanas de tiempo se deben mostrar en orden cronológico por visita, es decir de la que tiene el inicio mas temprano a la que tiene el inicio mas tardío.

DEPOT_TIME_WINDOW_SECTION $\{depot-id\} \{early\} \{late\}$. Ventana de tiempo para el almacén. Especifica el horario de trabajo de los almacenes, similar al de los clientes.

VEH_TIME_WINDOW_SECTION $\{vehicle-id\} \{early-1\} \{late-1\} \dots -1$. Tiempo disponible de los vehículos, horarios de trabajo. Indica todos los turnos disponibles que tiene un camión.

DURATION_BY_VEH_SECTION $\{visit-id\} \{veh-1-id\} \{duration-1\} \{veh-2-id\} \{duration-2\} \dots -1$. Especifica el tiempo de maniobra de cada vehículo en cada localidad.

DEPOT_COMPAT_SECTION $\{visit-id\} \{depot-id\} \{sense\} \dots -1$. En esta sección se especifica que almacén o CEPRO debe satisfacer una demanda de un cliente, esta sección mantiene una relación muy estrecha con la de DEMAND_SECTION.

VEH_DEPOT_SECTION $\{veh-id\} \{depot-id\} \{sense\} \dots -1$. Indica a que almacén pertenece cada vehículo, y que por lo tanto será el lugar de donde saldrá y a donde deberá llegar.

MAXIMUM_ATTENTION_CAPACITY_SECTION {*visit-id*} {*max_vehicle*}.

Esta es una nueva sección que indica el tipo máximo de vehículo que se puede recibir en el cliente {*visit-id*} especificado.

MAXIMUM_VEHICLES_NUMBER_SECTION {*visit-id*} {*number*}. Esta es una nueva sección en la cuál se especifica el número de vehículos máximo que se puede atender al mismo tiempo en un cliente en un horario determinado.

En el Anexo B se muestra un ejemplo completo de una instancia real de RoSLoP, así como las tablas y archivo plano que se utilizaron para obtener dicha instancia.

6.1.6 Descripción de la Salida del Sistema

La salida del sistema incluye los siguientes elementos: las rutas seguidas por cada uno de los vehículos, los horarios de visitas a los clientes y la distribución del producto en cada uno de los viajes de la flotilla. En la Tabla 6.14 se despliegan las rutas y horarios seguidos por los vehículos.

Tabla 6.14. *ProgFleteros.*

Campo	Descripción
Id_Empresa ¹	Identifica al Cliente
Id_Sucursal ¹	
Fecha ¹	Identifica la fecha en que se está corriendo el proceso.
Id_FolioProgramacion ¹	Viaje del vehículo para satisfacer un cliente. También se emplea para especificar la distribución de carga en la Tabla 6.15.
Id_FolioPedido ¹	Número de pedido que se está satisfaciendo
FechaSalida ¹	Hora en que sale de la localidad anterior donde se ubicaba el vehículo.
FechaLegada ¹	Hora en que llega al cliente especificado por Id_Empresa e Id_Sucursal.
EmpresaVehiculo ¹	Especifica a que almacén pertenece el vehículo que realiza este viaje.
SucursalVehiculo ¹	
Id_Ruta	
Id_Vehiculo ¹	Vehículo utilizado en este viaje.
EmpresaOrigen ¹	Donde inicia el vehículo el viaje.
SucursalOrigen ¹	
EmpresaDestino ¹	Hacia donde se dirige el vehículo en este viaje.
SucursalDestino ¹	
Id_TipoVehiculo ¹	Tipo del vehículo que se está utilizando.
Remolque1	
Dolly	
Remolque2	
enviado_sn	
Cajas	
Envases	
Generado_sn	

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

La distribución de la carga en los vehículos se especifica a detalle en la Tabla 6.15, donde se muestra en que posición de los contenedores va cada uno de los productos.

Tabla 6.15. ProgFleterosDetalle.

Campo	Descripción
Id_FolioProgramacion ¹	Viaje para el cual se especifica a detalle la distribución del producto en un vehículo.
Id_Partida	
Id_TipoContenido	
Id_Contenido ¹	Un producto dentro de este viaje.
PalletProgramado ¹	Contenedor donde se ubicará el producto dentro del vehículo especificado en la Tabla 6.14.
PosicionProgramada ¹	Posición dentro del contenedor donde irá el producto.
Cantidad	Número de cajas de producto que irán en ese contenedor, en la posición especificada.
ConPlastico	
TarimaCompleta ¹	Especifica si es una tarima homogénea.

¹ Campo requeridos para construir los casos de prueba

6.2 Experimento 1: Comparación del Sistema de Transporte Basado en Heurísticos contra el algoritmo del Vecino más Cercano.

Este experimento compara la heurística de solución propuesta en la metodología de este trabajo de investigación con una heurística determinista muy conocida, la del vecino más cercano [Solomon, 1987]. El objetivo es demostrar que el vecino más cercano, no es suficiente para alcanzar los estándares de eficiencia requeridos por la embotelladora de productos.

La embotelladora de producto establece que el sistema será eficiente sólo si cumple con las siguientes condiciones: que el pedido de un cliente sea satisfecho por lo menos en un 98%; que el tiempo máximo para proporcionar una solución sea de diez minutos; y que el número de vehículos empleados para cubrir la demanda no sobrepase el número de unidades disponibles.

6.2.1 Hipótesis

“La eficiencia del Algoritmo del Vecino más Cercano, en la solución de casos de prueba reales del problema RoSLoP, es menor a la del Sistema de Transporte Basado en Heurísticos.”

6.2.2 Casos de Prueba

Los casos de prueba empleados en este experimento son casos reales presentados en una embotelladora de productos. La tabla 6.16 muestra la descripción de tales casos. Las columnas uno y dos identifican al caso con la fecha cuando surgió en la embotelladora. Las columnas tres, cuatro y cinco representan los parámetros básicos del caso de prueba. La columna seis representa el número total de conexiones entre ciudades dadas por la matriz de conexiones, se toma como un indicador del tamaño del problema. Las columnas siete y ocho contienen el número de vehículos que puede ser atendido en una localidad (almacén o cliente) en forma simultánea. La última columna es la cantidad de cajas de producto solicitadas por todos los clientes que componen la caso RoSLoP que se describe.

Tabla 6.16. Descripción de las instancias RoSLoP Reales.

Instancia		Descripción de los casos RoSLoP Reales						
Caso	Fecha año-mes-día	Clientes	Vehículos	Almacenes	Arcos	Capacidad de los clientes	Capacidad del Almacén	Demanda del Cliente
Caso 01	20050819	5	8	1	10	1	2	8598
Caso 02	20050706	7	8	1	10	1	2	15338
Caso 03	20050713	6	8	1	10	1	2	9654
Caso 04	20050718	5	8	1	10	1	2	7831
Caso 05	20050719	6	8	1	10	1	2	11329
Caso 06	20050708	7	8	1	10	1	2	14607
Caso 07	20050709	7	8	1	10	1	2	15445
Caso 08	20050711	7	8	1	10	1	2	16698
Caso 09	20050712	7	8	1	10	1	2	15375
Caso 10	20050713	6	8	1	10	1	2	9654
Caso 11	20050715	5	8	1	10	1	2	11187
Caso 12	20050716	6	8	1	10	1	2	10777
Caso 13	20050718	5	8	1	10	1	2	7831
Caso 14	20050719	6	8	1	10	1	2	11329
Caso 15	20050720	1	8	1	10	1	2	763
Caso 16	20050721	7	8	1	10	1	2	12810
Caso 17	20050722	7	8	1	10	1	2	15353
Caso 18	20050723	5	8	1	10	1	2	11164
Caso 19	20050726	7	8	1	10	1	2	14929
Caso 20	20050727	6	8	1	10	1	2	11187
Caso 21	20050728	7	8	1	10	1	2	12572
Caso 22	20050729	7	8	1	10	1	2	14523
Caso 23	20050730	5	8	1	10	1	2	8030
Caso 24	20050801	1	8	1	10	1	2	2765
Caso 25	20050806	7	8	1	10	1	2	12624
Caso 26	20050808	4	8	1	10	1	2	8170
Caso 27	20050810	5	8	1	10	1	2	6846
Caso 28	20050811	1	8	1	10	1	2	1008
Caso 29	20050819	5	8	1	10	1	2	8598
Caso 30	20050820	7	8	1	10	1	2	12681

Caso 31	20050822	6	8	1	10	1	2	10953
Caso 32	20050823	7	8	1	10	1	2	15040
Caso 33	20050824	7	8	1	10	1	2	12624
Caso 34	20050825	7	8	1	10	1	2	14262
Caso 35	20050827	6	8	1	10	1	2	10605
Caso 36	20050829	7	8	1	10	1	2	12424
Caso 37	20050830	7	8	1	10	1	2	13600
Caso 38	20050831	7	8	1	10	1	2	12532
Caso 39	20050901	7	8	1	10	1	2	11584

6.2.3 Condiciones del Experimento

El algoritmo para resolver las tarea de definición y asignación de rutas, asignación de cargas y asignación de horarios, fue implementado en el lenguaje de programación C#. El sistema de transporte basado en heurísticos (TSHA) se ejecutó durante diez minutos. Las condiciones de la experimentación fueron: procesador AMD Athlon XP, 1.3 Ghz, 192 Mb en RAM, Sistema Operativo Windows XP. Las condiciones del equipo utilizado en la experimentación fueron similares a las de la compañía embotelladora. La configuración de los parámetros del algoritmo implementado se muestra en la Tabla 6.17.

Tabla 6.17. Configuración de los parámetros del algoritmo ACS para BPVRP.

Parámetro	Valor
Núm. Hormigas	15
Colonias	5
q_0	0.9
β	2
ρ	0.1

6.2.4 Resultados Experimentales

En la Tabla 6.18 se muestran los resultados obtenidos por TSHA y la heurística del vecino más cercano (NN, Nearest Neighborhood). Se muestra el número de vehículos usados en la solución construida, la demanda satisfecha, el porcentaje de demanda satisfecha (demanda satisfecha en la solución entre demanda total a satisfacer) y el tiempo de ejecución. Las columnas dos, cuatro, seis y ocho muestran los resultados de NN, mientras que las columnas tres, cinco, siete y nueve corresponden a los resultados de TSHA.

Tabla 6.18. Resultados de NN y TSHA.

Instancias	Indicadores de Eficiencia							
	Vehículos usados en la solución		Demanda Satisfecha		% Demanda Satisfecha		Tiempo de Ejecución	
	NN	TSHA	NN	TSHA	NN	TSHA	NN	TSHA
Caso 01	8	4	8589	8598	99	100	1 seg.	10 min.
Caso 02	8	7	10197	15325	66	99	1 seg.	10 min.
Caso 03	8	4	9639	9639	99	99	1 seg.	10 min.
Caso 04	8	3	7831	7831	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 05	8	7	5529	11324	48	99	1 seg.	10 min.
Caso 06	8	6	11961	14588	81	99	1 seg.	10 min.
Caso 07	8	8	11322	15441	73	99	1 seg.	10 min.
Caso 08	8	7	6754	16698	40	100	1 seg.	10 min.
Caso 09	8	7	13933	15375	90	100	1 seg.	10 min.
Caso 10	8	4	9639	9639	99	99	1 seg.	10 min.
Caso 11	8	5	11187	11187	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 12	8	6	10705	10756	99	99	1 seg.	10 min.
Caso 13	8	3	7831	7831	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 14	8	7	5529	11324	48	99	1 seg.	10 min.
Caso 15	1	1	748	748	98	98	1 seg.	10 min.
Caso 16	8	6	11186	12805	87	99	1 seg.	10 min.
Caso 17	8	7	11020	15348	71	99	1 seg.	10 min.
Caso 18	8	5	11164	11164	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 19	8	7	13261	14908	88	99	1 seg.	10 min.
Caso 20	8	5	9580	11187	85	100	1 seg.	10 min.
Caso 21	8	7	10682	12572	84	100	1 seg.	10 min.
Caso 22	8	7	11125	14518	76	99	1 seg.	10 min.
Caso 23	8	8	8030	8030	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 24	3	3	2765	2765	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 25	8	6	10849	12614	85	99	1 seg.	10 min.
Caso 26	8	3	8091	8165	99	99	1 seg.	10 min.
Caso 27	8	8	6846	6846	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 28	1	1	1008	1008	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 29	8	4	8589	8598	99	100	1 seg.	10 min.
Caso 30	8	7	11077	12681	87	100	1 seg.	10 min.
Caso 31	8	5	10953	10953	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 32	8	7	8019	15040	53	100	1 seg.	10 min.
Caso 33	8	5	11302	12624	89	100	1 seg.	10 min.
Caso 34	8	7	11283	14262	79	100	1 seg.	10 min.
Caso 35	8	5	10605	10605	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 36	8	6	11154	12424	89	100	1 seg.	10 min.
Caso 37	8	6	12091	13600	88	100	1 seg.	10 min.
Caso 38	8	6	8407	12532	67	100	1 seg.	10 min.
Caso 39	8	6	11546	11584	99	100	1 seg.	10 min.

En la Tabla 6.19 se muestra una comparación del desempeño del algoritmo TSHA después de 5 segundos y al alcanzar el tiempo límite asignado: 10 minutos.

Tabla 6.19. Comparación del desempeño de TSHA con diferentes criterios de parada

Instancias	Indicadores de Eficiencia					
	Vehículos usados en la solución		Demanda Satisfecha		% de la Demanda Satisfecha	
	TSHA ¹	TSHA ²	TSHA ¹	TSHA ²	TSHA ¹	TSHA ²
Caso 01	5	4	8598	8598	100	100
Caso 02	7	7	15325	15325	99	99
Caso 03	5	4	9639	9639	99	99
Caso 04	5	3	7831	7831	100	100
Caso 05	8	7	11324	11324	99	99
Caso 06	7	6	14588	14588	99	99
Caso 07	8	8	13779	15441	89	99
Caso 08	8	7	16698	16698	100	100
Caso 09	8	7	15375	15375	100	100
Caso 10	6	4	9639	9639	99	99
Caso 11	6	5	11187	11187	100	100
Caso 12	7	6	10756	10756	99	99
Caso 13	4	3	7831	7831	100	100
Caso 14	8	7	11324	11324	99	99
Caso 15	1	1	748	748	98	98
Caso 16	7	6	12805	12805	99	99
Caso 17	8	7	15348	15348	99	99
Caso 18	6	5	11164	11164	100	100
Caso 19	8	7	14908	14908	99	99
Caso 20	6	5	11187	11187	100	100
Caso 21	8	7	12572	12572	100	100
Caso 22	8	7	13046	14518	89	99
Caso 23	8	8	8030	8030	100	100
Caso 24	3	3	2765	2765	100	100
Caso 25	7	6	12614	12614	99	99
Caso 26	4	3	8165	8165	99	99
Caso 27	8	8	6846	6846	100	100
Caso 28	1	1	1008	1008	100	100
Caso 29	5	4	8598	8598	100	100
Caso 30	7	7	12681	12681	100	100
Caso 31	5	5	10953	10953	100	100
Caso 32	7	7	15040	15040	100	100
Caso 33	6	5	12624	12624	100	100
Caso 34	8	7	14262	14262	100	100
Caso 35	5	5	10605	10605	100	100
Caso 36	6	6	12424	12424	100	100
Caso 37	7	6	13600	13600	100	100
Caso 38	7	6	12532	12532	100	100
Caso 39	6	6	11584	11584	100	100

¹ Tiempo de Ejecución 5 segundos.² Tiempo de Ejecución 10 minutos

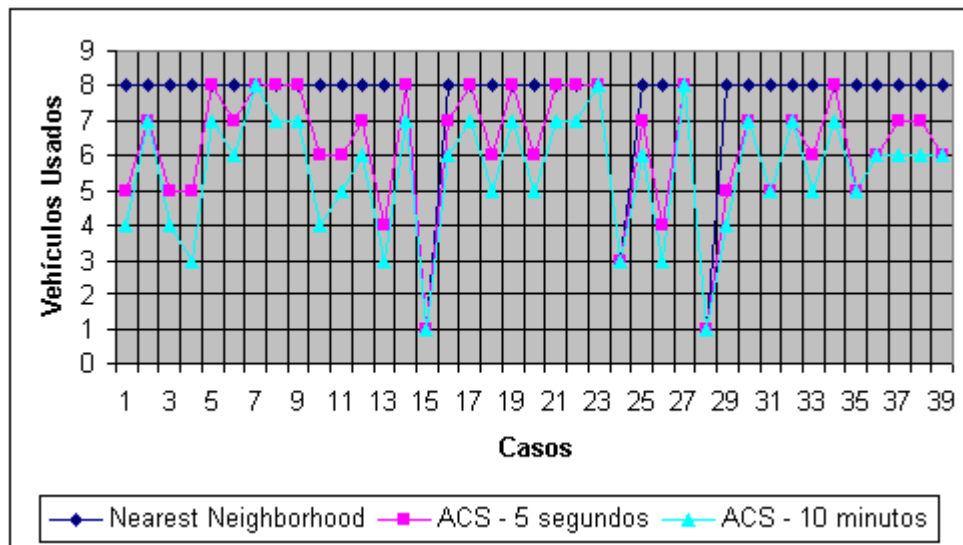
6.2.5 Análisis de los Resultados

Se puede ver en la Tabla 6.18, que aún cuando el algoritmo NN es el más veloz, sólo satisfizo en promedio el 46.1% de la demanda de todos los casos, y de ellos sólo en un

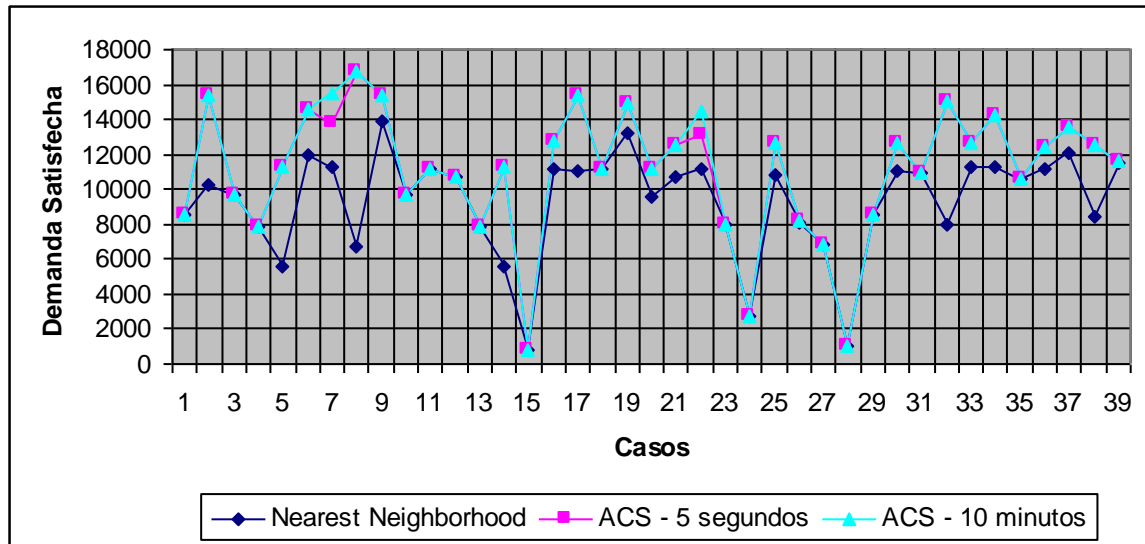
16.6% logró ocupar una cantidad menor de vehículos a la disponible, con lo cual se muestra que su eficiencia está muy por debajo del límite aceptado.

Por otra parte, TSHA mostró un desempeño a la altura de los estándares exigidos, logró satisfacer la demanda del 100% de los casos (se consideran satisfechos aquellos casos cuya demanda fue atendida en el rango del 98% al 100 %, este umbral considera mermas que aún en procedimientos manuales no son enviadas), y en un 92.3% de los casos utilizó un número de vehículos menor al disponible. La Figura 6.5 muestra la comparación del desempeño del NN y el TSHA en cuanto a número de vehículos y demanda satisfecha.

De acuerdo a la Tabla 6.19, el incremento en el parámetro de TSHA que controla el criterio de parada del algoritmo (tiempo) puede afectar de forma considerable la solución. Se puede observar que en los primeros cinco segundos de ejecución del algoritmo se logran mejoras considerables (en comparación con Nearest Neighborhood) y es posible mejorar más la solución si se extiende el tiempo dado. Este comportamiento del algoritmo también se puede apreciar en la Figura 6.5.



a) Comparación de vehículos usados.



b) Comparación de la demanda satisfecha.
Figura 6.6. Comparación del Desempeño de las Heurísticas.

Del análisis de resultados se concluye que el Nearest Neighborhood no es una heurística adecuada para resolver el problema RoSLoP en casos reales. Además, aún cuando el TSHA se desempeña en forma adecuada durante los primeros segundos de su ejecución (alcanza soluciones que cumplen el estándar establecido por la compañía), si se extiende el tiempo, sin pasar del límite establecido, se pueden mejorar las soluciones beneficiando a la embotelladora. Por lo anterior se acepta la hipótesis del experimento.

6.3 Experimento 2: Comparación del Sistema de Transporte Basado en Heurísticos contra la Solución Manual.

Este experimento muestra que es posible resolver casos reales del problema RoSLoP, a través de la metodología propuesta en este trabajo de investigación, de tal manera que se obtengan soluciones eficientes que mejoren los resultados de las soluciones manuales.

6.3.1 Hipótesis

La realización de este experimento parte del siguiente supuesto:

“Es posible mejorar el Procedimiento Manual utilizado en la solución de los casos de reales del problema RoSLoP usando el Sistema de Transporte Basado en Heurísticos.”

6.3.2 Casos de Prueba

Para este experimento se tomaron cinco casos de prueba del conjunto mostrado en el Experimento 1 (casos 30 a 34 de la Tabla 6.16). Para dichos casos, fue proporcionada la solución que obtiene el procedimiento manual que lleva a cabo la compañía.

6.3.3 Condiciones de la Experimentación

Los algoritmos fueron implementados en el lenguaje de programación C#. La comparación del procedimiento manual se hizo con el TSHA con criterio de parada ajustado a diez minutos. Los parámetros de control del algoritmo ACS y las condiciones del equipo fueron similares a los del experimento 1.

6.3.4 Resultados Experimentales

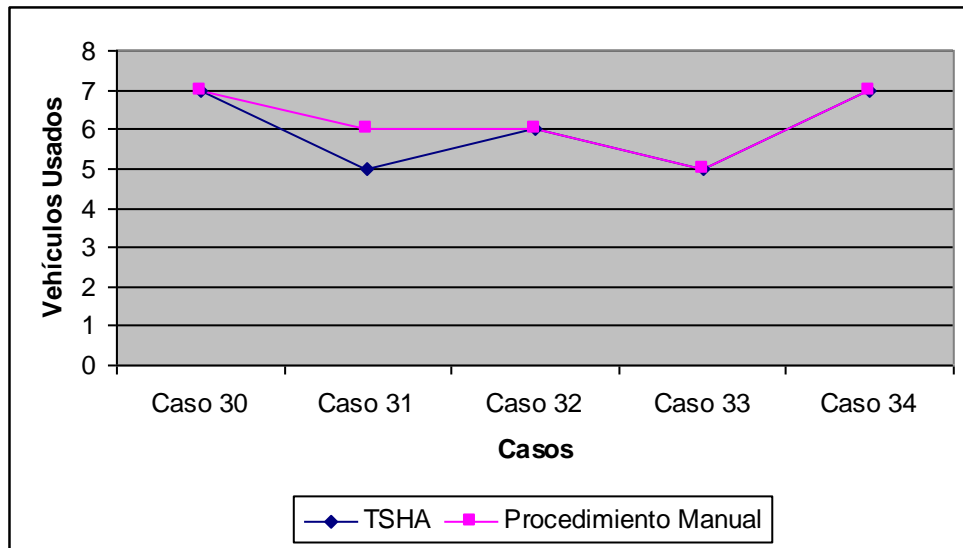
La Tabla 6.20 compara los resultados de ambos procedimientos: manual y TSHA.

Tabla 6.20. Comparación de TSHA con el Procedimiento Manual.

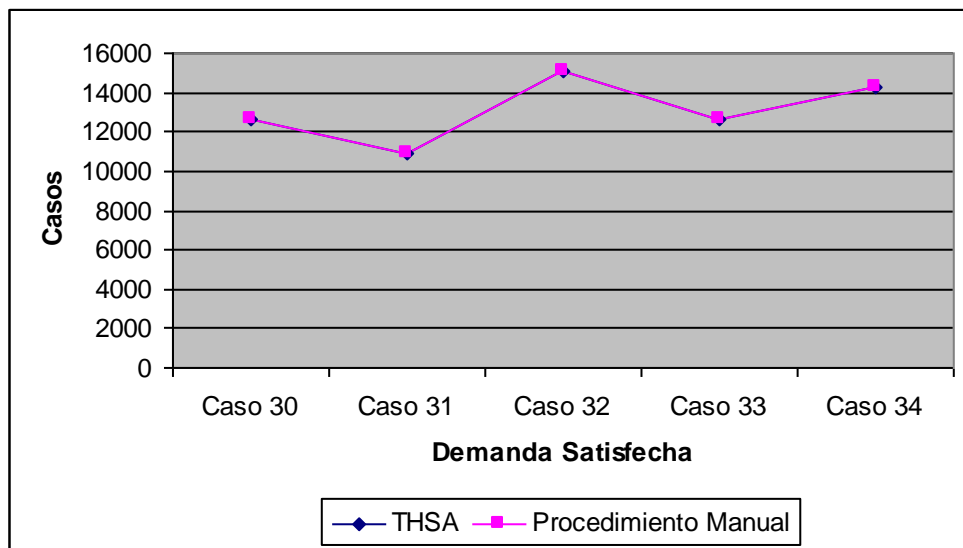
Instancias	Indicadores de Eficiencia							
	Vehículos usados en la solución		Demanda Satisfecha		% de Demanda Satisfecha		Tiempo de Ejecución	
	TSHA	Manual	TSHA	Manual	TSHA	Manual	TSHA	Manual
Case 30	7	7	12681	12681	100	100	10 minutos	16 horas
Case 31	5	6	10953	10953	100	100	10 minutos	16 horas
Case 32	6	6	15040	15040	100	100	10 minutos	16 horas
Case 33	5	5	12624	12624	100	100	10 minutos	16 horas
Case 34	7	7	14262	14262	100	100	10 minutos	16 horas

6.3.5 Análisis de los Resultados

Como se muestra en la Tabla 6.20, el desempeño de TSHA en comparación con el procedimiento manual, mejora el tiempo consumido en todos los casos. También mejora el número de vehículos utilizados en un 20% de los casos. En todos los casos, TSHA logra satisfacer las demandas utilizando a lo más el mismo número de vehículos empleado en la solución manual. Una vista gráfica del desempeño de los dos procedimientos comparados en esta sección se presenta en la Figura 6.6.



a) Comparación por vehículos usados.



b) Comparación por demanda satisfecha.

Figura 6.7. Comparación del desempeño del Procedimiento Manual contra el sistema TSHA.

En conclusión, los resultados arrojados por este experimento mostraron que el sistema basado en la metodología propuesta en este trabajo de investigación obtiene mejores soluciones que el procedimiento manual utilizado por la compañía que se estudia, por lo que se acepta la hipótesis de este experimento.