

Planeamiento de Rutas de Abastecimiento de Autopartes Nacionales de Toyota Argentina.

Autores: Federico Peruchet¹, Pablo Alejandro Picasso².

¹ Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura,
Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

f_peruchet@yahoo.com.ar

<http://www.fceia.com.ar>

² Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura,
Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

alepicasso2001@hotmail.com

<http://www.fceia.com.ar>

Director: Rogelio Morán³.

³ Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura,
Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

moran@fceia.unr.edu.ar

<http://www.fceia.com.ar>

Resumen. El proyecto aborda el problema de desarrollar un sistema de apoyo a las decisiones que permita a los responsables de programar las rutas de abastecimiento encontrar las alternativas de menor costo y disminuir el tiempo de respuesta ante posibles cambios del entorno y de la empresa. A través de la utilización de un método metaheurístico, más específicamente optimización por colonias de hormigas, el sistema permite encontrar rutas de abastecimiento que buscando minimizar los costos cumplen con las restricciones impuestas.

1. Introducción

El Sistema de Producción Toyota (TPS) se ha convertido hoy en día en una filosofía de gerenciamiento, ampliamente difundida, orientada a optimizar todos los procesos de producción para lograr productos de la más alta calidad y al más bajo costo. El TPS impulsa la excelencia en la fabricación, produciendo lo necesario, en el momento justo, con la mejor calidad y a un precio competitivo. La logística de autopartes no queda exenta de estos principios.^[01]

El transporte de piezas para producción desde el establecimiento de cada proveedor hacia la planta de Toyota Argentina (TASA) se realiza por medio del sistema *Milk Round*, llevado a cabo por un operador logístico. Conceptualmente, el *Milk Round* es un método de recolección de partes a través de un recorrido que incluye a los proveedores de piezas y a su destinatario, TASA. En la **Ilustración 1.1** del Anexo se muestra un esquema que representa el concepto del *Milk Round*. Este recorrido se diseña en función de restricciones y variables externas, como la disponibilidad horaria de despacho de los proveedores, distancia entre proveedores y volúmenes a retirar, teniendo en cuenta que el costo del recorrido debe ser mínimo. El camión asignado a cada recorrido, inicia el trayecto desde un punto geográfico, en este caso, el depósito del operador logístico (ubicado dentro del predio de TASA), y prosigue su ruta hacia los distintos destinos definidos, (una serie de proveedores y TASA) hasta completar el ciclo y terminar en el punto de inicio. El objetivo de realizar la operación logística a través de este sistema es transportar pequeñas cantidades con la mayor frecuencia posible, logrando reducir los costos del transporte, aumentar la eficiencia de la carga y minimizar los niveles de *stock* en planta. Para cada proveedor se define una cantidad de entregas diarias, en las que será visitado por un camión del *Milk Round* para recolectar las partes que se hayan solicitado.

El recorrido trazado para cada camión es fijo para todo el mes de recolección, al igual que su ventana horaria, es decir, los horarios de llegada y de salida de cada punto del trayecto (ver **Ilustración 1.2** del Anexo).

Mes a mes se efectúa un programa de producción a corto plazo en el cual se determina no sólo el volumen total de producción sino también la cantidad deseada de cada modelo de vehículo que será fabricado diariamente. Con esto quedan determinados los requerimientos de materiales para cada día de producción (explosión de requerimiento de partes). Mes a mes se esperará abastecer a la fábrica con un volumen de piezas correspondiente al volumen de vehículos planificado, ajustándose el resultado final, por supuesto, a la eficiencia obtenida en la línea de producción. Estos requerimientos de materiales se distribuyen de manera balanceada entre todas las entregas diarias del mismo proveedor. Luego a partir de los requerimientos de los materiales, se determinan los requerimientos en cantidades de cajas (transportadas en *pallets*) y en cantidades de *racks*, para llegar a los requerimientos de espacio a ser transportado en cada entrega. A modo de ejemplo, en las **Ilustraciones 1.3 y 1.4** del Anexo se muestran fotografías de las cajas y *Racks* utilizados. Con esta información, la empresa operadora de la logística local propone una configuración de rutas para satisfacer tales requerimientos. Finalmente se establece la programación de horarios de recolección de las partes en cada proveedor para todos los transportes.

El cronograma de recolección es de frecuencia fija siendo variable el volumen que levantará en cada visita de acuerdo a la evolución real de la producción. La misma está diseñada en función de las disponibilidades de horarios de cada proveedor y de TASA. El operador logístico le proporciona a cada proveedor la ventana horaria (período de tiempo comprendido entre la llegada y la salida del camión del establecimiento del proveedor dentro del horario laborable de la jornada) donde arribará el camión. Durante este período se efectuará la descarga de embalajes vacíos, si correspondiera, y la carga de los medios con las partes a transportar. En el cronograma se establecen además, los horarios de descarga de las partes en la planta de acuerdo a la capacidad de descarga de camiones con que se cuenta en TASA. Elementalmente el horario de arribo a cada proveedor contempla el tiempo de viaje de acuerdo a la distancia que tuvo que haber recorrido el transporte para llegar hasta el lugar y el tráfico que hubiera por el momento del día en que se realiza el viaje.

La empresa encargada de la logística factura a Toyota el costo del *Milk Round* de acuerdo a la cantidad y tipo de los transportes utilizados y a la cantidad de Km recorridos por cada uno. Además, el costo por Km recorrido varía de acuerdo a la distancia que se recorra en el día: a mayor distancia recorrida en un día por un camión, menor será el costo por Km. para esa distancia. En el **gráfico 1.1** se puede observar el costo de transporte para un camión de 80 m³ en función de la distancia recorrida. A esto, se le debe sumar el costo de los peajes.

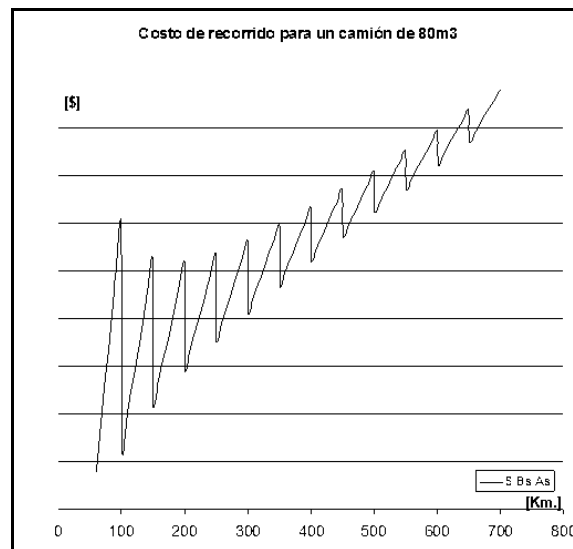


Gráfico 1.1: Costo de transporte por Km para un camión de 80 m³

Se puede observar que el costo por Km para cada camión es decreciente en función de la cantidad de Km totales que recorre diariamente.

Entonces, el costo de la operación del *Milk Round* dependerá no solo de la configuración de rutas adoptadas (los proveedores que se visitan en una ruta), sino también de la programación que con estas se establezcan.

La configuración de rutas antes mencionada tanto como su programación, se realiza sin ningún sistema de soporte y se basa principalmente en la experiencia de la persona que la realiza. Esto es posible ya que mes a mes los proveedores son los mismos desde hace un tiempo considerable, por la política de relación a largo plazo de la empresa y además, el volumen del plan de producción en condiciones normales, no varía súbitamente.

2. Definición del problema abordado

De acuerdo a lo explicado anteriormente, se puede observar que la determinación del Milk Round se descompone en dos procesos:

- El planeamiento de rutas o ruteo: consiste en definir los recorridos necesarios para abastecer todas las entregas diarias de todos los proveedores. Se entiende por recorrido al conjunto de proveedores que visitará un camión y al orden en que lo hará desde que sale del depósito hasta que regresa.
- La programación de rutas: parte del planeamiento de rutas desarrollado en el punto anterior. Consiste en asignar los recorridos que realizará cada camión de la flota, asegurando que todos los recorridos sean cumplidos. Se definen en esta instancia, para cada recorrido, los horarios de arribo y partida del transporte tanto en el depósito como en los proveedores.

El costo del *Milk Round* depende del planeamiento y de la programación de rutas. Actualmente ambos procesos son realizados en forma manual por el operador logístico. Se detecta en esta situación una oportunidad de mejora para el proceso.

Este trabajo se focalizará en desarrollar un método analítico que actúe como sistema de soporte a las decisiones para resolver el problema del planeamiento de rutas con el objetivo de minimizar el costo del *Milk Round*. Los proveedores sobre los que se enfoca este trabajo son los que se encuentran ubicados en la provincia de Buenos Aires, debido a que éstos definen la mayoría de las rutas y presentan una mayor complejidad desde el punto de vista combinatorio. Se utilizará este método para generar una solución, y con la finalidad de poder evaluarla, se ofrecerá también una solución al problema de programación de rutas, realizada en forma manual utilizando el método actual.

El problema planteado se trata de una variante del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) que ha sido ampliamente estudiado desde que Dantzig y Ramser lo introdujeron en 1959. El VRP consiste en establecer las rutas a seguir para una flota de vehículos que deben salir de un depósito y recorrer determinados puntos (los proveedores) una sola vez y regresar al depósito, de manera que se satisfagan todos los requerimientos desde cada proveedor y se verifiquen las restricciones operacionales (carga máxima de los vehículos, horarios de recepción de vehículos, etc.), con el objetivo de minimizar el costo total del recorrido de todos los vehículos.

En la modelización del problema elegido, las restricciones identificadas fueron:

- *Capacidad del transporte.* Se considera una flota de transporte de capacidad homogénea. Como unidad de medida se seleccionó el m³ y se consideró la capacidad real factible de ser utilizada de los camiones.
- *Entregas del proveedor.* Dos entregas correspondientes al mismo proveedor no podrán ser transportadas en el mismo viaje del camión. Es decir, que el camión en cualquier momento deberá volver a TASA antes ser capaz de transportar alguna entrega de los mismos proveedores que los de las cargas que contiene. Entonces, cada proveedor será visitado tantas veces por día como entregas diarias tenga definida. Se presenta en este punto una diferencia remarcable con respecto a la versión más básica del VRP.
- *Equidistancia en los arribos de las entrega.* Si bien no existen restricciones en cuanto a los horarios de recolección de partes en los proveedores, es necesario que los arribos a TASA de las diferentes entregas de un mismo proveedor sean aproximadamente equidistantes entre si. Esto se traduce en una restricción de *Compatibilidad de carga*, ya que influye en las posibles combinaciones de proveedores que puede visitar un mismo camión en un determinado momento. Debido a que, si por ejemplo, en algún momento el camión está cargando la segunda entrega de un proveedor de cuatro entregas diarias, quedarán fuera de la lista factible de proveedores a seguir visitando durante este viaje, entre otros, aquellos proveedores de dos entregas diarias que ya hubieran entregado la primera entrega (se está considerando que para poder entregar la segunda entrega, ya deben haber realizado la primera). Si esta condición no se cumpliera, no se podría garantizar la equidistancia.

3. Métodos de Resolución

Los métodos de resolución se pueden agrupar en Métodos Exactos, Métodos Heurísticos y Métodos Metaheurísticos.^[02]

Los Métodos Exactos presentan una gran calidad en soluciones para problemas reducidos pero debido a la naturaleza exponencial del tiempo de cálculo, en la práctica sólo las instancias con pocos clientes (hasta 50 aproximadamente) pueden ser resueltas consistentemente por métodos exactos. La relación “tamaño de problema”/“tiempo” no es la única desventaja que plantea este tipo de soluciones, debido a que en general cualquier cambio en el problema a resolver, algo que es habitual en la aplicación a problemas del mundo real, exige un gran esfuerzo de adaptación del sistema o incluso rediseñar partes de la estrategia utilizada para resolver el problema de partida. Por último, en el caso de que la solución óptima no sea alcanzada el sistema no es capaz de ofrecer una solución factible. En cualquier sistema real sería preferible que se brinde alguna solución aunque no sea la mejor.^[03]

Los Métodos Heurísticos son procedimientos simples que realizan una exploración relativamente limitada del espacio de soluciones y generalmente producen soluciones de buena calidad con un uso computacional moderado. Además, la mayoría de ellas pueden ser extendidas para contemplar las diversas restricciones encontradas en los casos reales.^[04] Actualmente, se encuentran aún ampliamente utilizados por los paquetes comerciales de optimización.^[05]

En los años recientes varias metaheurísticas han sido propuestas para enfrentar el VRP.^[06] Estos son procedimientos genéricos que exploran exhaustivamente el espacio de soluciones posibles de un problema de forma inteligente, es decir intentan especializar la búsqueda de buenas soluciones en zonas prometedoras del espacio y descartar aquellas en las que es improbable encontrarlas.^[07] En general, las metaheurísticas obtienen mejores resultados que las heurísticas clásicas, pero incurriendo en mayores tiempos de ejecución (que de todos modos, son inferiores a los de los algoritmos exactos).

La elección en el presente trabajo de una técnica metaheurística por sobre un método exacto se debe, en primer lugar, a la necesidad de obtener una buena solución con tiempos de procesamiento relativamente cortos que se adecuen a la disponibilidad de recursos, aun con la consecuencia de no obtener la mejor solución. Los algoritmos metaheurísticos son relativamente fáciles de programar, permiten modificar los datos de entrada del problema rápidamente, y además son altamente flexibles. Esta última característica fue determinante en la elección del algoritmo de optimización por colonias de hormigas, debido a que se procedió a la modelización de las restricciones de manera progresiva. En primer lugar, se introdujeron sólo restricciones de capacidad de transporte para, en una segunda etapa, introducir restricciones en cuanto a la equidistancia horaria en la recepción de partes.

La elección de la metaheurística en particular, Optimización por Colonias de Hormigas (OCH) estuvo motivada por el desafío académico de utilizar un método reciente que ha probado tener muy buenos resultados en la resolución de problemas de ruteo de vehículos. Además, una ventaja del método OCH aplicado al VRP planteado en este proyecto es la fácil analogía que se puede hacer entre las hormigas artificiales del algoritmo y los camiones del *Milk Round*. Literalmente la hormiga va construyendo la ruta cumpliendo con todas las restricciones impuestas del mismo modo que lo haría un camión. En cada iteración las hormigas, interdependientes entre sí, construyen una solución factible. En consecuencia para introducir nuevas restricciones se modifica, en el algoritmo, únicamente el módulo de construcción de soluciones.

4. La optimización por Colonia de Hormigas

En el presente informe se hará una breve descripción del método de Optimización por Colonia de Hormigas. En el Apartado 2 del Anexo se puede encontrar una ampliación del marco teórico. Para obtener información más detallada sobre el método se recomienda recurrir a la bibliografía citada.

La optimización por Colonia de Hormigas (OCH) es un método de optimización combinatoria que está basado en el comportamiento de las hormigas; insectos sociales que viven en colonias y que debido a su colaboración mutua son capaces de mostrar comportamientos complejos y realizar tareas difíciles desde el punto de vista de una hormiga individual, como por ejemplo encontrar los caminos más cortos entre su hormiguero y las fuentes de alimento.^[08] Científicos han mostrado que muchos niveles de comportamiento observados en insectos sociales pueden ser explicados por modelos simples en los cuales solo se presenta un tipo de

comunicación descentralizada e indirecta a través de algún medio físico-químico. En el idioma inglés existe una palabra específica para definir este tipo de comunicación: *Stigmergy*, la cual ha sido traducida al español como estigmergia.^[09] Una importante contribución de las primeras investigaciones sobre el comportamiento de las hormigas fue descubrir que la mayor parte de la comunicación entre estos individuos está basada en el uso de una sustancia química producida por las hormigas, llamada *feromona*.^[10] Cuando las hormigas caminan desde la fuente del alimento hasta el hormiguero y viceversa, depositan feromonas sobre el suelo, formando un *rastro de feromona*. Las hormigas pueden oler la feromona y tienden a elegir probabilísticamente los caminos marcados con concentraciones de feromonas más fuertes.

Los algoritmos de OCH se basan en una colonia de hormigas artificiales, esto es, unos agentes computacionales simples que trabajan de manera cooperativa y se comunican mediante rastros de feromona artificiales. Estos algoritmos son esencialmente algoritmos constructivos: en cada iteración del algoritmo, cada hormiga construye una solución al problema recorriendo un grafo de construcción, moviéndose por nodos factibles de ser visitados. Cada arista del grafo, que representa los posibles pasos que la hormiga puede dar, tiene asociada dos tipos de información que guían el movimiento de la hormiga:

- Información heurística, que mide la preferencia heurística de moverse desde el nodo r hasta el nodo s , o sea, de recorrer la arista a_{rs} . Se nota por η_{rs} . Las hormigas no modifican esta información durante la ejecución del algoritmo.
- Información de los rastros de feromona artificiales, que mide la “deseabilidad aprendida” del movimiento de r a s . Imita a la feromona real que depositan las hormigas naturales. En el caso de las hormigas artificiales, los rastros de feromona artificiales son valores numéricos que están disponibles únicamente de manera local. Esta información se modifica durante la ejecución del algoritmo dependiendo de las soluciones encontradas por las hormigas. Se nota por τ_{rs} . La cantidad de feromona depositada por la hormiga artificial será función de la calidad de la solución encontrada y normalmente sólo depositan feromona después de generar una solución completa. Además, la evaporación de feromona en los algoritmos de OCH es diferente a como se presenta en la naturaleza, ya que la inclusión del mecanismo de evaporación es una cuestión fundamental para evitar que el algoritmo quede estancado en óptimos locales. La evaporación de feromona permite a la colonia de hormigas artificiales olvidar lentamente su historia pasada para redireccionar su búsqueda hacia nuevas regiones del espacio. Esto evita una convergencia prematura del algoritmo hacia óptimos locales.

El algoritmo cuenta con parámetros de ajuste (α , β , γ , λ), los cuales se deberán configurar para lograr un mejor resultado. Los mismos definen la influencia de las feromonas y de la información heurística. Además, se debe definir la cantidad de hormigas n y el parámetro ρ que determina la evaporación de la feromona.^[11]

Por último, para mejorar la eficiencia y eficacia del sistema, los algoritmos OCH pueden enriquecerse con habilidades adicionales. Ejemplos típicos son la capacidad de mirar más allá de la siguiente transición, o la optimización local, que

persiguen mejorar la eficacia, o la llamada lista de candidatos, que contiene un conjunto de los estados vecinos mas prometedores para mejorar la eficiencia del algoritmo.^[12]

En el **Esquema 2.1** del anexo se puede encontrar la estructura del algoritmo del Ant System Híbrido para el VRP.^[13]

5. Implementación del Algoritmo

El sistema de apoyo a las decisiones desarrollado, necesitará contar con los siguientes datos de entrada:

- Capacidad del transporte utilizado
- Matriz de entregas de los proveedores
- Matriz de paridad de entregas
- Matriz de distancias entre proveedores

La correcta confección de tales datos permitirá modelar la situación antes descripta.

5.1. Capacidad del transporte utilizado

El primer paso para determinar la capacidad del transporte es definir la unidad de medida utilizada. Para el sistema se trata de una unidad abstracta, y el único requisito es mantener coherencia con esta unidad al expresar todos los datos de entrada. El volumen podría ser expresado por ejemplo en: cantidad de *pallets* completos, Kg. o m^3 . Para una mayor claridad en la expresión de los datos, se eligió como unidad de medida el m^3 . Los transportes considerados son camiones con una capacidad real de $84 m^3$ cada uno. La capacidad real factible de ser utilizada de los camiones es algo menor, dado que si bien el compartimento del camión tiene 2,5 m de altura y 13,8 m de largo, la altura máxima que se puede utilizar es 2,4m. Por lo tanto el volumen considerado será $79,48 m^3 = (13,8m. \times 2,4m. \times 2,4m.)$.

5.2. Matriz de entregas de los proveedores

Se trata de una matriz E en donde cada elemento (p, e) representa la entrega e (expresada en la unidad de medida utilizada, en este caso m^3) para el proveedor p . La cantidad de filas de E , en principio, sería igual a la cantidad de proveedores considerados, pero para respetar el mismo orden que en la definición de los nodos la primera fila contendrá todos sus elementos iguales a 0 debido a que el nodo 1 pertenece a la representación del depósito de Toyota. Mientras que la cantidad de columnas quedará determinada por el máximo número de entregas diarias que haya en alguno de los proveedores. El elemento (p_j, e_k) de la matriz será 0 si para el

proveedor p_j se cumple que e_k es mayor que la cantidad de entregas diarias para tal proveedor. A los efectos de la simulación para cada proveedor en particular no se cargará la entrega n si no se realizó la entrega $n - 1$. Debido a que la programación de la producción se realiza de manera balanceada a lo largo de todo el mes (concepto japonés conocido como *Heijunka*), se supondrá la misma carga para cada una de las entregas del mismo proveedor. Sin embargo, si fuera necesario podrían evaluarse alternativas en donde la carga máxima que se espera en cada entrega fuera distinta. Cada Nodo que representa a un proveedor será visible para el agente computacional y podrá ser visitado si todavía tiene entregas pendientes al momento de la evaluación por parte del agente.

Los medios de estibado de las partes depende en cada caso de la forma, peso y material con el cual están fabricadas. Existen dos familias distintas de medios: cajas y *racks*. Las cajas tienen tamaños muy diversos, pero apilables entre si. La cantidad de piezas por caja también es variable, dependiendo de la forma y de cuán eficiente sea la utilización del volumen de la caja. Para transportarlas se acomodan en *pallets* de tamaño de base estandarizado que permiten apilarlos. A su vez, la altura de los *pallets* será variable de acuerdo a la cantidad de cajas utilizadas no pudiendo superar 1,20 m de altura por condiciones gremiales del sector automotriz, esta altura incluyendo la base y la tapa de los *pallets*. Los *racks* son medios metálicos construidos específicamente para transportar piezas de determinada forma y material. Esta diferenciación en los medios de estibado es necesaria debido a que los *pallets* y los *racks* no son apilables entre si.

El espacio ocupado por los Racks es constante, por lo que el cálculo del volumen necesario para transportar las piezas que utilicen Racks no presenta mayores dificultades. En cambio, no es directa la determinación para las piezas que se transportan en cajas, ya que el modo en que las cajas se acomodan en el *pallet* definirá el volumen real necesario para transportarlo. Una primera aproximación sería suponer que la cantidad de cajas que se puede transportar en cada *pallet* pueda ser calculada como el volumen del *pallet* (1,20m. x 1,00m. x 1,20m.) descontando el volumen no utilizable debido a la base y a la tapa, dividido por el volumen de la caja. Esto supondría una eficiencia de carga del *pallet* del 100%. Sin embargo, del análisis de los datos reales se comprueba que tal hipótesis implica aceptar un margen de error considerable.

En este trabajo para la aplicación del algoritmo se propone el siguiente método. Para cada tipo de caja se calcula la “eficiencia de carga completa en un *pallet*” como el volumen máximo de cajas que se pueden transportar en un *pallet* dividido por el volumen del *pallet* (1,20m. x 1,00m. x 1,20m.). Para conocer la cantidad máxima de cajas de cada tipo que se pueden transportar en un *pallet* se determinan las “capas” o “niveles” de cajas que se pueden apilar en cada *pallet* y la cantidad de cajas que entran por nivel (para finalmente multiplicar las cajas de la base por la altura). En general, en un mismo *pallet* se transportan distintos tipos de cajas. En consecuencia, para el cálculo de carga se considerará el volumen total de la entrega de cada tipo de caja ponderado por la inversa de su eficiencia de carga completa para un *pallet*. Tal consideración es también una aproximación, debido a que la combinación de las distintas cajas, podría resultar en una mayor o menor eficiencia por la diferencia de alturas de cada caja y porque no todos los niveles

necesariamente son del mismo tipo de caja. Los volúmenes a entregar por los proveedores según el tipo de embalaje se pueden encontrar en la **Tabla 3.1** del Anexo.

Para el cálculo de cada entrega, se realizará el siguiente procedimiento:

1. Identificación de los medios utilizados por cada proveedor (cajas, *rack*)
2. Determinación de la cantidad de cada tipo de medios transportado en cada entrega, como la cantidad de medios necesarios por día (datos de salida del Sistema de Órdenes de Partes) dividida sobre la cantidad de entregas diarias del proveedor (con ésta hipótesis se supone entregas balanceadas, *Heijunka*).
3. Determinación del volumen necesario para el transporte en *pallets* de cajas. (con el método antes mencionado)
4. Determinación del volumen necesario para el transporte de *racks*. En este caso, el cálculo es directo, teniendo en cuenta el volumen total ocupado por todos los Racks transportados en cada entrega (ubicados de modo de poder ser transportados dentro del volumen del contenedor del camión)
5. Determinación del volumen de la entrega calculado como la suma del volumen de los *racks* y del volumen de los *pallets*, para cada proveedor para cada entrega.

El cálculo final de cada entrega utilizado en este proyecto se puede ver en la Matriz de Entregas, en la **Tabla 3.2** del Anexo (Los nombres de los proveedores han sido reemplazados por siglas, correspondiendo N01 a TASA).

5.3. Matriz de paridad de entregas

Esta matriz, insertada en el algoritmo especialmente para poder abordar este problema específico, se utiliza para permitir organizar las ventanas horarias de arribo a TASA de cada proveedor. La restricción de que los arribos de las diferentes entregas de un mismo proveedor sean aproximadamente equidistantes entre sí influye en las posibles combinaciones de proveedores que puede visitar un mismo camión en un determinado momento. Debido a que, si por ejemplo, en algún momento de la simulación el camión está cargando la segunda entrega de un proveedor de cuatro entregas diarias, quedarán fuera de la lista factible de proveedores a seguir visitando durante este viaje, entre otros, aquellos proveedores de dos entregas diarias que ya hubieran entregado la primera entrega (se está considerando que para poder entregar la segunda entrega, ya deben haber realizado la primera). Si esta condición no se cumpliera, no se podría garantizar la equidistancia.

Por lo tanto, con cada proveedor se procede a dividir la jornada de trabajo de TASA en tantos lapsos como entregas tenga ese proveedor (esquema de la **Ilustración 5.1**). Para lograr la equidistancia a lo largo del día entre las entregas, es condición necesaria que haya una y sólo una entrega en cada lapso.

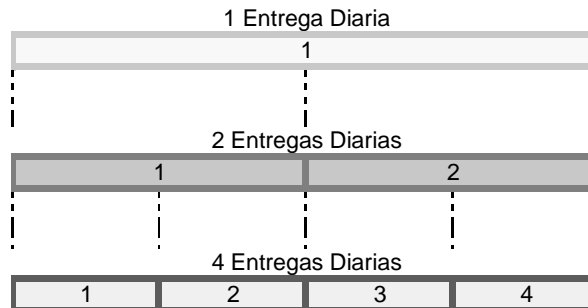


Ilustración 5.1: Esquema de restricción de entregas diarias

Entonces, se puede concluir que para lograr cumplir la condición, el camión podrá transportar simultáneamente entregas con las siguientes condiciones:

- Con los proveedores de una entrega diaria, no hay restricciones
- Con proveedores de dos entregas, el camión debe estar transportando el mismo número de entrega (para todos la primera o para todos la segunda). Y en caso de tener proveedores de cuatro entregas diarias, si transporta la primera entrega de un proveedor de 2, solo la primera o segunda de proveedores de 4. Y si transporta la segunda entrega de un proveedor de 2, solo la tercera o cuarta de 4 dependiendo de la paridad con la que se haya realizado la primera.
- Con proveedores de cuatro entregas, el camión debe estar transportando el mismo número de entrega para los todos los proveedores que tengan 4 entregas diarias. En caso de tener proveedores de dos entregas, la regla es la explicada anteriormente.

Estas condiciones se pueden modelar mediante el uso de un vector que identifique la característica de los proveedores que el transporte puede visitar en un determinado momento y una matriz en donde cada fila se asocie a un proveedor indicando las características de los camiones (de acuerdo a los proveedores que ya haya visitado) por las que puede ser visitado. De este modo, para cada camión los proveedores posibles de ser visitados serán aquellos cuya fila asociada coincidan con el vector del transporte.

Finalmente, para que la carga de un determinado proveedor pueda ser levantada, la misma debe ser compatible con cada una de las cargas transportadas por el camión en el momento que se evalúa la decisión.

Lo explicado recientemente se resume en la **Tabla 5.2**:

| | | CARGAS COMPATIBLES A TRANSPORTAR | | | | | | | |
|--------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------|---|------------------------------|---|---|---|
| | | Entrega N° | PROVEEDOR 1 ENTREGA DIARIA | PROVEEDOR 2 ENTREGAS DIARIAS | | PROVEEDOR 4 ENTREGAS DIARIAS | | | |
| | | | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| CARGA TRANSPORTADA | PROVEEDOR 1 ENTREGA DIARIA | 1 | O | O | O | O | O | O | O |
| | PROVEEDOR 2 ENTREGAS DIARIAS | 1 | O | O | X | O | O | X | X |
| | | 2 | O | X | O | X | X | O | O |
| | PROVEEDOR 4 ENTREGAS DIARIAS | 1 | O | O | X | O | X | X | X |
| | | 2 | O | O | X | X | O | X | X |
| | | 3 | O | X | O | X | X | O | X |
| | | 4 | O | X | O | X | X | X | O |

| | |
|---|---------------------|
| O | Visita Factible |
| X | Visita no permitida |

Tabla 5.2: matriz de factibilidad de entregas

5.4. Matriz de distancias entre proveedores

Esta matriz será utilizada para evaluar las distintas rutas exploradas, por lo tanto deberá estar expresada en unidades proporcionales a las que se usarán en la función objetivo. En esta matriz el elemento (a, b) representa la distancia en Km para que el transporte se mueva desde el proveedor a hasta el proveedor b . Como se explicó anteriormente el costo de la configuración del *Milk Round* dependerá de la cantidad de Km que se recorren en cada ruta, de los peajes que se deban cruzar en tales rutas y de la programación de rutas. El método propuesto buscará minimizar el costo por medio de la reducción de Km totales recorridos.

Para obtener los datos de la matriz de distancias se utilizó Google Earth (o Google Maps), un software de localización Geográfica. Una vez ubicados los nodos sobre el mapa, se obtuvo la distancia entre los proveedores por las rutas nacionales o autopistas más convenientes que puedan ser recorridas por camiones del tamaño considerado (84 m^3). Por ejemplo, ningún trayecto incluye el llamado “camino de cintura” que rodea a la ciudad de Buenos Aires y por el cual no pueden circular camiones de carga. Si el nodo Origen y el nodo Destino son iguales, el costo o distancia de transitar por esa ruta será 10000, un número lo suficientemente grande como para que ese arco no sea elegido ya que es una magnitud casi 100 veces mayor que el resto de los elementos de la matriz.

La matriz de distancias utilizada se encuentra en la **Tabla 3.3** del Anexo.

6. Salida del algoritmo

Como resultado del algoritmo se obtendrá un vector con los nodos (cada uno asociado a algún proveedor o al depósito) que se visitarán y en el orden en que se visitarían

si se contara con único transporte. Este vector puede ser dividido en un conjunto de vectores, a los que se denominarán “Pétalos”, que inician y terminan su recorrido en el depósito (en este caso N01 (TASA)). El resultado de la simulación queda entonces conformado por un conjunto de pétalos que inician y finalizan su recorrido en N01 (TASA). El resultado de la simulación se encuentra en la **Tabla 4.1** del Anexo.

En esta etapa es conveniente realizar una validación sobre el resultado propuesto por el algoritmo, que consiste en confeccionar el *Lay Out* de carga (con las vistas laterales y superior) para cada uno de los pétalos propuestos por la simulación. A pesar de que el algoritmo evalúa la restricción de capacidad limitando el volumen total transportado, se podría dar el caso de que al querer distribuir la carga en compartimento del camión, no fuera factible transportarla debido a las distintas dimensiones de la carga y las restricciones explicadas anteriormente con respecto al apilado de *racks* y *pallets*. En la **Ilustración 4.2** del Anexo se muestra a modo de ejemplo el *Lay Out* de carga del camión para uno de los pétalos obtenidos.

En la situación real, se cuenta con más de un transporte disponible para ser utilizado. Además, el tiempo necesario para realizar el recorrido de un pétalo será en todos los casos menor a un día, por lo que un camión podrá recorrer en un día 1, 2 o más pétalos. Se define como ruta a los pétalos asignados a un camión en un día.

En definitiva, la simulación propondrá un conjunto de rutas para visitar cada uno de los proveedores y cada una de las entregas, pero todavía falta una instancia importante para resolver el problema: la programación de rutas.

7. Programación De Rutas

La programación de rutas tiene una fuerte incidencia en el costo del *Milk Round*, dado que como se explicó previamente el costo por Km para un determinado camión depende de la cantidad de Km que éste recorra en un día. La programación de rutas está sujeta a una serie de restricciones que están detalladas en el Apartado 5 del Anexo.

La resolución del problema de programación de rutas no forma parte del objeto de estudio de este trabajo, por lo que se procederá solamente a presentar una buena solución encontrada con el fin de poder evaluar la conveniencia del ruteo propuesto.

El objetivo será encontrar la programación horaria factible de los transportes de partes de menor costo posible. Las variables a definir serán la asignación de recorridos (pétalos) para cada transporte, así como el horario en que se visitarán cada uno de los proveedores de los pétalos determinados y el horario de arribo al depósito de Toyota. En la **Ilustración 5.2** se muestra la programación de ruta para un camión específico.

8. Resultados

Una vez obtenida la programación de las rutas en la flota de vehículos, se está en condiciones de calcular el costo del proceso de abastecimiento por *Milk Round*. Tal

programación se debió adecuar al resto de las rutas existentes para los proveedores no considerados en la simulación. La reducción total en Km representa un 4,98% con respecto al valor original. Mientras que la reducción de costo representa un 19,93% del costo original del abastecimiento para los proveedores considerados. Esto se explica por la mejor utilización de la flota de transporte. Desde el punto de vista económico, es evidente la conveniencia de la configuración propuesta ya que no se necesita ningún tipo de inversión, solo se trata de un cambio en la organización de los despachos de las entregas. La aplicación de la propuesta implicaría cambio en los horarios de carga en cada uno de los proveedores lo cual puede requerir cierto tiempo de negociaciones.

La reducción de Km en la logística tiene otro beneficio además del aspecto económico: se mejora el proceso en cuanto al cuidado del medio ambiente. Al realizar una menor cantidad de Km se reduce la emisión de gases CO₂ que liberan los vehículos.

9. Conclusiones

En la comparación de costos realizada anteriormente, se asienta la viabilidad económica de la propuesta, la cual promete una reducción de 19,93% del actual costo del *Milk Round* que cubre los proveedores considerados para utilizar el algoritmo. Esta programación del *Milk Round* se planteó a partir de la solución de ruteo brindada por el algoritmo desarrollado. Se obtuvo una disminución del 4,98% en la cantidad de Km diarios respecto a los Km recorridos actualmente para poder visitar a los proveedores considerados. La viabilidad técnica fue observada al verificar que se cumplieran todas las restricciones planteadas. También presenta beneficios desde el punto de vista ambiental al reducir la emisión de CO₂. Los resultados obtenidos permiten concluir que el método analítico desarrollado ofrece a quien toma las decisiones una herramienta para poder encontrar mejores soluciones al VRP planteado que el método utilizado actualmente.

Una vez diseñado el sistema, brinda una gran flexibilidad y rapidez para responder a necesidades de re-organización del *Milk Round* ante cambios en el volumen de producción, los proveedores o la cantidad de entregas de cada uno ellos. Además, de este modo se asegura a la empresa el *Know How* de planeamiento de rutas para crear alternativas que sean factibles y el proceso se logra independizar de la persona que lo realice. Aún más, el uso de un método computacional permite evitar aquellas restricciones ficticias que fueron creadas para simplificar el problema. Por ejemplo, en la configuración actual de *Milk Round* todos los proveedores de 4 entregas diarias no podían ser transportados con proveedores con distinta cantidad de entregas. Esta restricción, simplificaba la resolución al acotar el espacio de soluciones factibles a evaluar, pero alejaba a la solución del óptimo como se puede ver en la solución propuesta, en la que proveedores de 4 entregas son transportados con proveedores de 1 y 2 entregas diarias.

En contrapartida, cuenta con la desventaja de no asegurar una solución óptima e incluso es posible obtener soluciones distintas para el mismo problema al volver a aplicar el método utilizando los mismos parámetros.

La participación humana seguirá siendo indispensable. No sólo por las verificaciones que se deben hacer, sino porque el método sólo resuelve el problema del ruteo sin aplicarse a la programación de las rutas.

La programación de rutas entonces, abre un desafío para enfrentar a futuro como una fuente de potenciales ahorros a través de su optimización. Junto a ella, se suman la optimización de espacio de las cargas a transportadas a través del rediseño de embalajes y la optimización de otros parámetros como la cantidad de entregas diarias de cada proveedor. Muchos de estos cambios irán de la mano con importantes cambios organizacionales.

10. Bibliografía

- [01] Liker, J., "The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer", McGraw-Hill, 2004.
- [02] Barajas, N., "Estado del Arte del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP)", Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia.
- [03] Gallego, O., "Soluciones basadas en Simulated Annealing para el VRPTW", Tesis para doctorado en Informática, Facultad de Informática, Universidad del País Vasco, 2002.
- [04] Balseiro, S., "Logística y distribución: Algoritmos para problemas de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y ventanas de tiempo", Tesis de Ingeniería Industrial, Departamento de Economía, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, 2006.
- [05] Toth, P. y Vigo, D., "An Overview of Vehicle Routing Problems. Monographs on Discrete Mathematics and Applications. In: The Vehicle Routing Problem", SIAM, 2000.
- [06] González Vargas, G. y González Aristazábal, F., "Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos. Un caso de estudio. Parte 1: formulación del problema", Revista Ingeniería e Investigación Vol. 26 No.3, pág. 149-156, 2006.
- [07] Diaz, A., "Recocido Simulado", Universidad de Oviedo, 2004.
- [08] Alonso, S., Cerdón, O., Fernández de Viana, I. y Herrera, F., "La metaheurística de optimización basada en Colonias de hormigas: Modelos y Nuevos Enfoques", Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, Ingeniería Informática, Granada (España)
- [09] Vallejo, R., Gómez C.E. y Vallejo, E., "Estudio Experimental del Comportamiento de Algoritmos de Hormigas Aplicados a Enrutamiento en Redes de Computadoras", ITESM - Campus Ciudad de México.
- [10] Dorigo, M. y Stützle T., "Ant Colony Optimization", MIT Press, 2004.
- [11] Bullnheimer, B., Hartl, R. y Strauss, C., "Applying the Ant System to the Vehicle Routing Problem", 1997.
- [12] Olivera, A., "Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos", Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo (Uruguay), 2004.
- [13] Doerner, K., Gronalt, M., Hartl, R., Reimann M., Strauss C. y Stummer, M., "Saving Ants for the vehicle routing problem", Report Series, 2001.

Anexo

1. Milk Round

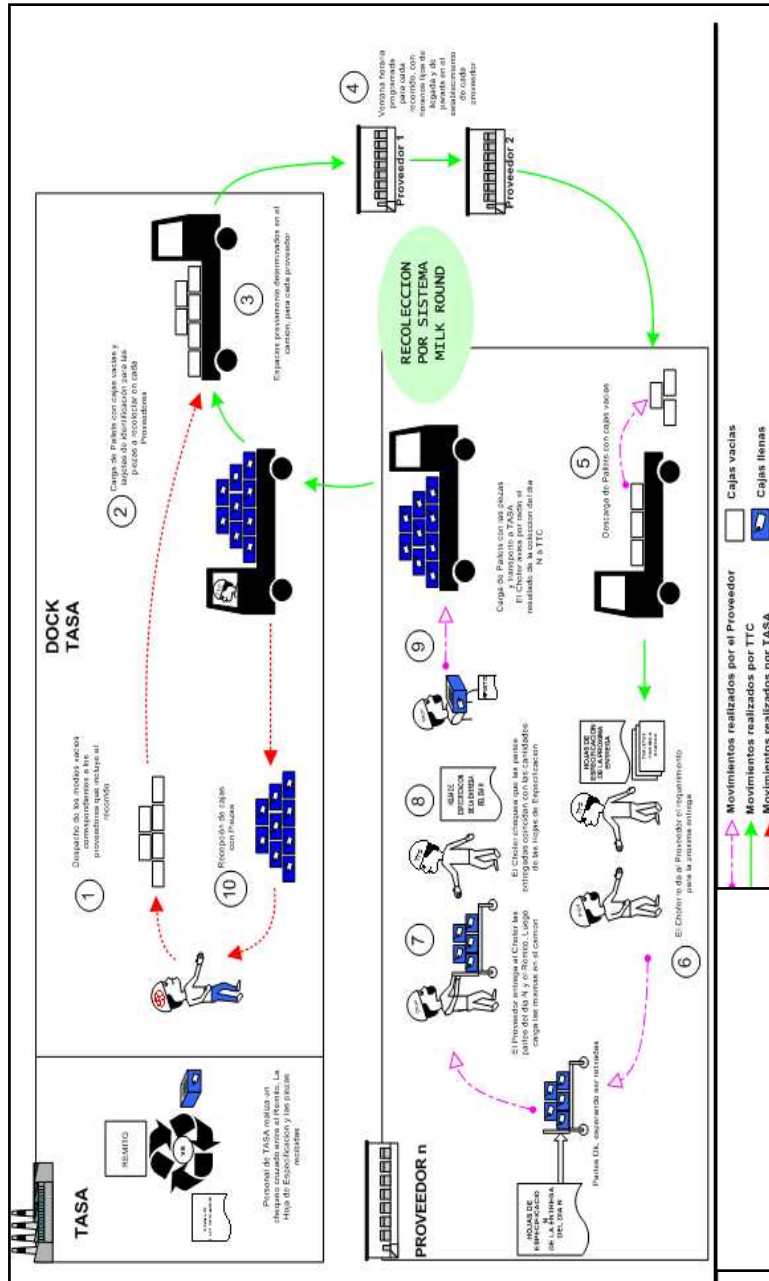


Ilustración 1.4: Sistema Milk Round

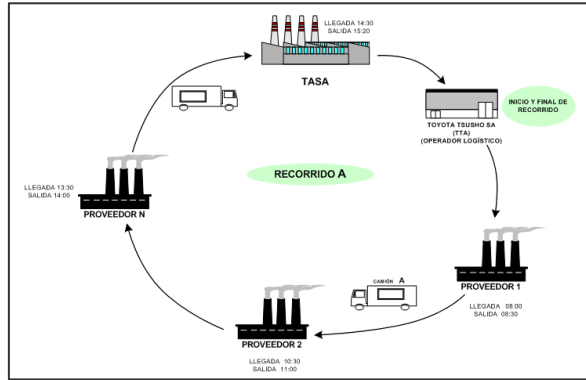


Ilustración 1.1: Concepto del Milk Round



Ilustración 1.2: Fotografías de Cajas y apilado en un pallet estándar de 1,2 m de altura



Ilustración 1.3: Fotografías de Racks

2. Ant system Híbrido para VRP

Bullnheimer, Hartl y Strauss fueron los primeros en aplicar el *Ant System* al VRP en un artículo en 1997. La construcción de la solución se realiza según la regla probabilística dada por:

$$p_{ij}(t) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{h \in \Omega} [\tau_{ih}(t)]^\alpha [\eta_{ih}]^\beta} & \text{si } j \in \Omega \\ 0 & \text{si } j \notin \Omega \end{array} \right\} \quad (1)$$

En donde el conjunto Ω contiene a los nodos no visitados que pueden ser insertados en la ruta actual manteniendo la factibilidad, es decir que no viola las restricciones del problema. Cuando $\Omega = \emptyset$ la hormiga vuelve al depósito y comienza de nuevo la construcción sobre los clientes aun no visitados. El algoritmo consiste en un *Ant System* con selección Elitista en el que cada hormiga aplica el algoritmo 2-opt al finalizar la construcción de su solución.

En el mismo artículo se propone modificar la regla de selección del próximo nodo, incorporando más información acerca del problema. La nueva regla es:

$$p_{ij}(t) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta [s_{ij}]^\gamma [k_{ij}]^\lambda}{\sum_{h \in \Omega} [\tau_{ih}(t)]^\alpha [\eta_{ih}]^\beta [s_{ih}]^\gamma [k_{ih}]^\lambda} & \text{si } j \in \Omega \\ 0 & \text{si } j \notin \Omega \end{array} \right\} \quad (2)$$

donde $s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$ es la medida de ahorro de Clarke & Wright y

$k_{ij} = \frac{Q_i + q_j}{Q}$ es una medida de la utilización del vehículo si j se agregara a la

ruta (siendo Q_i la demanda acumulada en la ruta parcial construida). Como s y k dependen de la ruta parcial, las probabilidades deben calcularse en cada paso de la construcción de cada solución, lo que implica altos costos en términos computacionales. Se puede refinar el algoritmo, incorporando a la visibilidad una medida del ahorro y así evitar recalcularlo en cada iteración.

Es intuitiva la idea de que la modificación en la regla de selección obtendrá mejores resultados para el VRP ya que utiliza más información del problema: la carga o demanda q que ahora tiene cada nodo y la capacidad que tiene el transporte. Éste método se denomina híbrido porque combina al *Ant System* con un algoritmo heurístico propio del VRP (Algoritmo de Ahorros).

La estructura del algoritmo es la siguiente

Esquema 2.1: Estructura del algoritmo del Ant system Híbrido para el VRP

Ant system Híbrido para el VRP

Paso 1 (Inicialización). (iteración $t=0$). Se asigna a cada Hormiga de las M totales una posición Inicial.

Paso 2 (Construcción). Para cada hormiga, se construye una solución factible al problema, siguiendo alguna regla de decisión probabilística para decidir en cada nodo el próximo destino basada en la medida del ahorro de Clarke & Wright, la utilización del vehículo, la cercanía de los nodos y la concentración de feromona para los arcos.

Paso 3 (Evaluación de la solución). Para cada hormiga se evalúa la calidad de la solución encontrada. Si se utilizara alguna heurística de optimización Local, se aplica en este paso antes de la evaluación.

Paso 4 (Actualización de Feromona) Se actualiza la matriz de feromona de acuerdo a la política de actualización elegida. (Selección elitista, Ranking, MAX-MIN, etc.)

Paso 5 Hacer $t=t+1$. Si $t \leq T_{\max}$ se asigna a cada hormiga un nodo y se repite desde Paso 2. Si no, FIN. Se toma la mejor solución encontrada entre todas las iteraciones.

3. Datos de entrada

3.1. Volumen de las entregas.

| | | Volumen | | | | |
|---|---------------|---------|---------|--------|--------|-----|
| # | PROV | Total | Pallets | Racks | | |
| | | | | Tipo 1 | Tipo 2 | Esp |
| 1 | N01 (TASA) | 0,00 | | | | |
| 2 | N02 | 2,88 | 2,88 | | | |
| 3 | N03 | 72,58 | 63,36 | | 9,22 | |
| 4 | N04 | 2,88 | 2,88 | | | |

| | | | | | | |
|----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5 | N05 | 5,76 | 5,76 | | | |
| 6 | N06 | 22,46 | 0,00 | 5,76 | 10,37 | 6,34 |
| 7 | N07 | 5,76 | 5,76 | | | |
| 8 | N08 | 5,76 | 5,76 | | | |
| 9 | N09 | 2,88 | 2,88 | | | |
| 10 | N10 | 20,74 | 0,00 | | 20,74 | |
| 11 | N11 | 19,01 | 8,64 | 10,37 | | |
| 12 | N12 | 30,53 | 25,92 | 4,61 | | |
| 13 | N13 | 5,76 | 5,76 | | | |
| 14 | N14 | 19,58 | 19,58 | | | |
| 15 | N15 | 46,08 | 0,00 | | 46,08 | |
| 16 | N16 | 29,96 | 0,00 | | | 29,96 |
| 17 | N17 | 28,51 | | | | 28,51 |
| 18 | N18 | 17,28 | 17,28 | | | |
| 19 | N19 | 41,47 | 2,88 | | | 38,59 |
| 20 | N20 | 34,56 | 34,56 | | | |

Tabla 3.1: volumen a entregar por proveedor y por tipo de embalaje

El volumen calculado para cada uno de los pallets se obtiene a través del siguiente cálculo.

Sean:

B_i : la cantidad de cajas de la parte i que pueden acomodarse, como máximo, en la base.

H_i : la cantidad de cajas de la parte i que se pueden apilar para que el *pallet* no supere la altura máxima establecida.

$B_i \times H_i$: será la cantidad de cajas de la parte i que se pueden transportar, cómo máximo, en un *pallet*.

V_i : el volumen de una caja de la parte i .

V_{pallet} : el volumen máximo teórico de un *pallet* completo.

$E_i = \frac{B_i \times H_i \times V_i}{V_{pallet}}$: Será el índice de eficiencia de uso del volumen del *pallet* para

la parte i .

Q_{pei} : la cantidad de cajas del proveedor p , en la entrega e , de la parte i que se deben transportar.

I_{pe}^{pallet} : la cantidad de tipo de partes del proveedor p , en la entrega e , que se deben transportar.

$$V_{pe}^{pallet} = \sum_{i=1}^{I_{pe}^{pallet}} \frac{Q_{pei} \times V_i}{E_i} : \text{Será el volumen de pallets a transportar para el proveedor } p, \text{ en la entrega } e .$$

Considerando este cálculo y la cantidad de entregas para cada proveedor en la **Tabla 2** queda definida a matriz de entregas:

| Proveedor | Cantidad de entregas | Entregas | | | |
|------------|----------------------|----------|--------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| N01 (TASA) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| N02 | 1 | 2,88 | 0 | 0 | 0 |
| N03 | 4 | 72,58 | 72,58 | 72,58 | 72,58 |
| N04 | 1 | 2,88 | 0 | 0 | 0 |
| N05 | 1 | 5,76 | 0 | 0 | 0 |
| N06 | 4 | 22,46 | 22,46 | 22,46 | 22,46 |
| N07 | 1 | 5,76 | 0 | 0 | 0 |
| N08 | 1 | 5,76 | 0 | 0 | 0 |
| N09 | 1 | 2,88 | 0 | 0 | 0 |
| N10 | 1 | 20,736 | 0 | 0 | 0 |
| N11 | 2 | 19,008 | 19,008 | 0 | 0 |
| N12 | 1 | 30,528 | 0 | 0 | 0 |
| N13 | 1 | 5,76 | 0 | 0 | 0 |
| N14 | 4 | 19,58 | 19,58 | 19,58 | 19,58 |
| N15 | 4 | 46,08 | 46,08 | 46,08 | 46,08 |
| N16 | 4 | 29,96 | 29,96 | 29,96 | 29,96 |
| N17 | 4 | 28,51 | 28,51 | 28,51 | 28,51 |
| N18 | 2 | 17,28 | 17,28 | 0 | 0 |
| N19 | 2 | 41,472 | 41,472 | 0 | 0 |
| N20 | 2 | 34,56 | 34,56 | 0 | 0 |

Tabla 3.2: Matriz de Entregas

La matriz de distancias está definida en la **Tabla 4**:

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | |
|-----------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| PROVEEDOR | N01 (TASA) | N02 | N03 | N04 | N05 | N06 | N07 | N08 | N09 | N10 | N11 | N12 | N13 | N14 | N15 | N16 | N17 | N18 | N19 | N20 | |
| 1 | N01 (TASA) | ### | 82 | 149 | 101 | 46 | 58 | 82 | 6 | 63 | 48 | 71 | 64 | 83 | 67 | 74 | 35 | 76 | 108 | 77 | 30 |
| 2 | N02 | 82 | ### | 101 | 54 | 64 | 28 | 15 | 76 | 36 | 38 | 11 | 48 | 14 | 17 | 21 | 47 | 15 | 56 | 14 | 52 |
| 3 | N03 | 149 | 101 | ### | 67 | 110 | 92 | 62 | 143 | 86 | 101 | 90 | 116 | 64 | 82 | 75 | 114 | 74 | 74 | 78 | 119 |
| 4 | N04 | 101 | 54 | 67 | ### | 83 | 47 | 26 | 95 | 49 | 53 | 38 | 86 | 20 | 34 | 26 | 66 | 25 | 7 | 24 | 71 |
| 5 | N05 | 46 | 64 | 110 | 83 | ### | 30 | 56 | 40 | 52 | 52 | 53 | 40 | 52 | 70 | 77 | 27 | 53 | 113 | 88 | 32 |
| 6 | N06 | 58 | 28 | 92 | 47 | 36 | ### | 25 | 52 | 9 | 10 | 17 | 76 | 26 | 15 | 18 | 23 | 22 | 54 | 23 | 28 |
| 7 | N07 | 82 | 15 | 62 | 26 | 56 | 25 | ### | 76 | 20 | 34 | 17 | 59 | 2 | 15 | 8 | 42 | 10 | 28 | 8 | 47 |
| 8 | N08 | 6 | 76 | 143 | 95 | 40 | 52 | 76 | ### | 57 | 42 | 65 | 58 | 77 | 61 | 68 | 29 | 70 | 102 | 71 | 24 |
| 9 | N09 | 63 | 36 | 86 | 49 | 52 | 9 | 20 | 57 | ### | 19 | 14 | 85 | 21 | 18 | 18 | 28 | 27 | 59 | 28 | 33 |
| 10 | N10 | 48 | 38 | 101 | 53 | 52 | 10 | 34 | 42 | 19 | ### | 27 | 86 | 35 | 19 | 26 | 13 | 32 | 64 | 30 | 18 |
| 11 | N11 | 71 | 11 | 90 | 38 | 53 | 17 | 17 | 65 | 14 | 27 | ### | 59 | 19 | 8 | 10 | 36 | 4 | 45 | 12 | 41 |
| 12 | N12 | 64 | 48 | 116 | 86 | 40 | 76 | 59 | 58 | 85 | 86 | 59 | ### | 58 | 63 | 103 | 69 | 72 | 70 | 78 | 64 |
| 13 | N13 | 83 | 14 | 64 | 20 | 52 | 26 | 2 | 77 | 21 | 35 | 19 | 58 | ### | 16 | 9 | 43 | 12 | 27 | 7 | 48 |
| 14 | N14 | 67 | 17 | 82 | 34 | 70 | 15 | 15 | 61 | 18 | 19 | 8 | 63 | 16 | ### | 7 | 32 | 9 | 41 | 13 | 37 |
| 15 | N15 | 74 | 21 | 75 | 26 | 77 | 18 | 8 | 68 | 18 | 26 | 10 | 103 | 9 | 7 | ### | 39 | 7 | 34 | 2 | 44 |
| 16 | N16 | 35 | 47 | 114 | 66 | 27 | 23 | 42 | 29 | 28 | 13 | 36 | 69 | 43 | 32 | 39 | ### | 41 | 73 | 42 | 5 |
| 17 | N17 | 76 | 15 | 74 | 25 | 53 | 22 | 10 | 70 | 27 | 32 | 4 | 72 | 12 | 9 | 7 | 41 | ### | 37 | 4 | 46 |
| 18 | N18 | 108 | 56 | 74 | 7 | 113 | 54 | 29 | 102 | 59 | 64 | 45 | 70 | 27 | 41 | 34 | 73 | 37 | ### | 34 | 78 |
| 19 | N19 | 77 | 14 | 78 | 24 | 88 | 23 | 8 | 71 | 28 | 30 | 12 | 78 | 7 | 13 | 2 | 42 | 4 | 34 | ### | 47 |
| 20 | N20 | 30 | 52 | 119 | 71 | 32 | 28 | 47 | 24 | 33 | 18 | 41 | 64 | 48 | 37 | 44 | 5 | 46 | 78 | 47 | ### |

Tabla 3.3: Matriz de Distancias

4. Resultado del algoritmo

La salida del algoritmo se resume en la **Tabla 4.1**:

| #Prov | Descripción | Km | Carga [m ³] | Carga transportada [m ³] |
|-------|----------------|-----|-------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 1/0 N01 (TASA) | 71 | 0 | 0 |
| 11 | 1/2 N11 | 4 | 19,01 | |
| 17 | 1/4 N17 | 25 | 28,51 | |
| 4 | 1/1 N04 | 7 | 2,88 | |
| 18 | 1/2 N18 | 27 | 17,28 | |
| 13 | 1/1 N13 | 14 | 5,76 | |
| 2 | 1/1 N02 | 82 | 2,88 | 76,32 |
| 1 | 2/0 N01 (TASA) | 149 | 0 | |
| 3 | 1/4 N03 | 62 | 72,58 | |
| 7 | 1/1 N07 | 82 | 5,76 | |
| 1 | 3/0 N01 (TASA) | 149 | 0 | 78,34 |
| 3 | 2/4 N03 | 86 | 72,58 | |
| 9 | 1/1 N09 | 63 | 2,88 | |
| 1 | 4/0 N01 (TASA) | 149 | 0 | 75,46 |
| 3 | 3/4 N03 | 110 | 72,58 | |
| 5 | 1/1 N05 | 46 | 5,76 | |

| | | | | |
|----|-----------------|-----|-------|-------|
| 1 | 5/0 N01 (TASA) | 35 | 0 | 78,34 |
| 16 | 1/4 N16 | 13 | 29,96 | 78,92 |
| 10 | 1/1 N10 | 10 | 20,74 | |
| 6 | 1/4 N06 | 52 | 22,46 | |
| 8 | 1/1 N08 | 6 | 5,76 | |
| 1 | 8/0 N01 (TASA) | 35 | 0 | 64,52 |
| 16 | 2/4 N16 | 5 | 29,96 | |
| 20 | 1/2 N20 | 30 | 34,56 | |
| 1 | 9/0 N01 (TASA) | 35 | 0 | 60,49 |
| 16 | 3/4 N16 | 69 | 29,96 | |
| 12 | 1/1 N12 | 64 | 30,53 | |
| 1 | 10/0 N01 (TASA) | 74 | 0 | 65,66 |
| 15 | 1/4 N15 | 7 | 46,08 | |
| 14 | 1/4 N14 | 67 | 19,58 | |
| 1 | 14/0 N01 (TASA) | 149 | 0 | |
| 3 | 4/4 N03 | 149 | 72,58 | 75,58 |
| 1 | 16/0 N01 (TASA) | 35 | 0 | |
| 16 | 4/4 N16 | 5 | 29,96 | 64,52 |
| 20 | 2/2 N20 | 30 | 34,56 | |
| 1 | 17/0 N01 (TASA) | 74 | 0 | |
| 15 | 2/4 N15 | 7 | 46,08 | 74,60 |
| 17 | 2/4 N17 | 76 | 28,51 | |
| 1 | 18/0 N01 (TASA) | 74 | 0 | |
| 15 | 3/4 N15 | 7 | 46,08 | 74,60 |
| 17 | 3/4 N17 | 76 | 28,51 | |
| 1 | 20/0 N01 (TASA) | 74 | 0 | |
| 15 | 4/4 N15 | 7 | 46,08 | 74,60 |
| 17 | 4/4 N17 | 76 | 28,51 | |
| 1 | 26/0 N01 (TASA) | 58 | 0 | |
| 6 | 2/4 N06 | 15 | 22,46 | 42,05 |
| 14 | 2/4 N14 | 67 | 19,58 | |
| 1 | 27/0 N01 (TASA) | 77 | 0 | 41,47 |
| 19 | 1/2 N19 | 77 | 41,47 | |
| 1 | 28/0 N01 (TASA) | 58 | 0 | 78,34 |
| 6 | 3/4 N06 | 17 | 22,46 | |
| 11 | 2/2 N11 | 45 | 19,01 | |
| 18 | 2/2 N18 | 41 | 17,28 | |
| 14 | 3/4 N14 | 67 | 19,58 | |
| 1 | 29/0 N01 (TASA) | 67 | 0 | |
| 14 | 4/4 N14 | 15 | 19,58 | |

| | | | | |
|----|-----------------|----|-------|-------|
| 6 | 4/4 N06 | 58 | 22,46 | 42,05 |
| 1 | 30/0 N01 (TASA) | 77 | 0 | |
| 19 | 2/2 N19 | 77 | 41,47 | 41,47 |
| 1 | 31/0 N01 (TASA) | | 0 | |

Tabla 4.1: Resultado de planeamiento de rutas brindado por el algoritmo utilizado

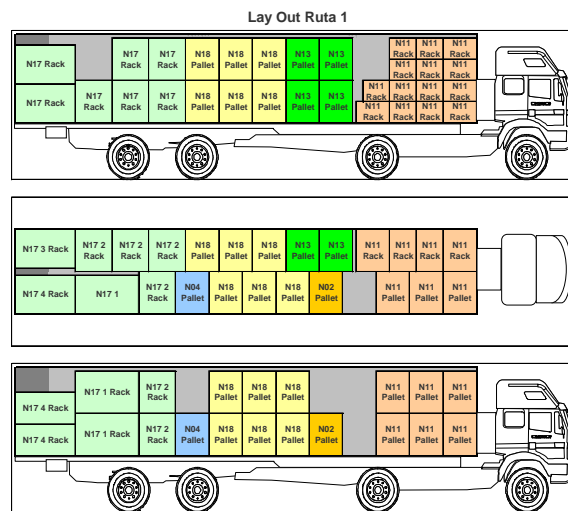


Ilustración 4.2: Validación de la restricción de capacidad en la salida del algoritmo.

5. Restricciones Para la programación

La programación de rutas deberá ser confeccionada de manera tal que se cumpla con las siguientes restricciones:

1. El recorrido asignado a cada camión no puede tener una longitud mayor a un día.
2. El horario de carga y descarga tanto en N01 (TASA) como en los proveedores es de 06:00 Hs. a 00:50 Hs. Si bien ningún camión podrá realizar operaciones de descarga y descarga fuera de ese horario, sí es posible que el camión este tránsito en cualquier momento del día.
3. Las ventanas horarias para carga y descarga de camiones, tanto en N01 (TASA) como en los proveedores, es de 30 minutos.
4. Existen 3 dársenas asignadas en N01 (TASA) para las actividades de carga y descarga de camiones del *Milk Round*. En consecuencia, en un determinado momento no podrán estar más de 3 camiones descargando las partes o cargando los medios vacíos en Toyota.

5. Se necesita tener en cuenta también los arribos de proveedores no considerados en la simulación. Estos proveedores serán incluidos en la programación de rutas considerando la solución actual.
6. Para el caso de proveedores con 2 o 4 entregas, se debe respetar el orden del número de entrega durante el día. Por ejemplo, en el caso de un proveedor con 4 entregas, no puede arribar a N01 (TASA) la entrega N°3 antes que la N°2.
7. Todos los proveedores tienen capacidad para cargar sólo una entrega por vez. No pueden haber dos o más camiones de dos o más rutas distintas en un proveedor al mismo tiempo.
8. El orden en que se recorren los nodos dentro de un pétalo **no** puede ser alterado, pero sí se puede invertir la secuencia completa, dado que cada pétalo es un subgrafo no dirigido, y no se modifican la cantidad de Km recorridos. Por ejemplo, los pétalos de la **Ilustración 4.5** se pueden intercambiar:

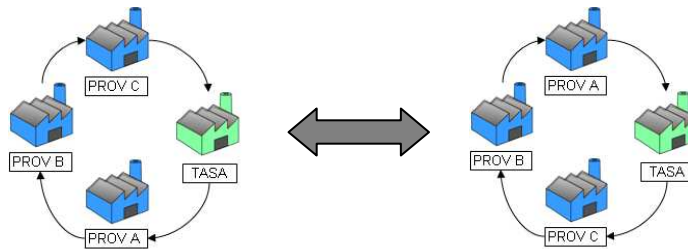


Ilustración 5.1: intercambiabilidad del sentido de recorrido

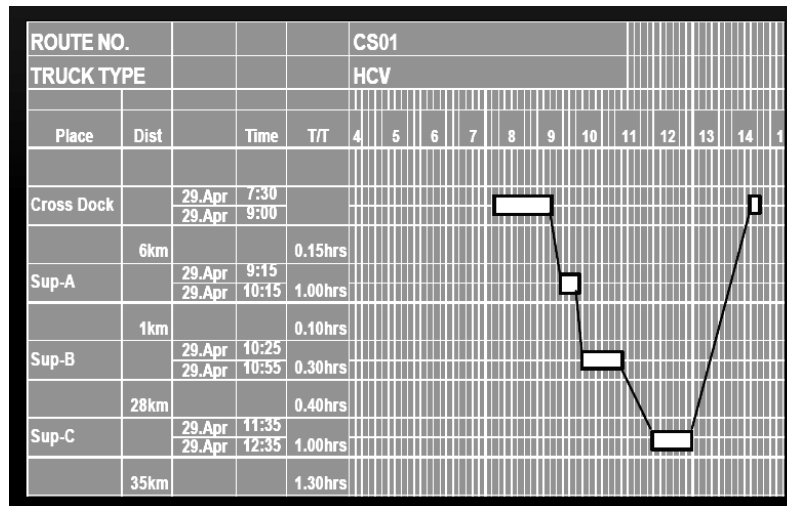


Ilustración 5.2: Programación de rutas para un camión específico.