



“Localización óptima de paraderos y diseño de rutas para el transporte del personal de trabajo de una empresa ubicada en la vía a Daule”

Arturo Sánchez¹, Jaime Sánchez², Ing. Fabricio Echeverría³
Instituto de Ciencias Matemáticas
Escuela Superior Politécnica del litoral
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil
aralsanc@espol.edu.ec¹, jairosan@espol.edu.ec², pechever@espol.edu.ec³

Resumen

Este trabajo presenta el planteamiento y solución del problema de la ubicación de paraderos y el traslado del personal de trabajo a una empresa ubicada a las afueras de la ciudad de Guayaquil, el cual se ha dividido en dos etapas. En la primera etapa se propone un modelo de programación entera para la localización de los paraderos utilizando una herramienta muy importante como lo es Gams, seguido del diseño de rutas en la segunda etapa realizado por medio de una heurística y posteriormente mejorando las soluciones encontradas por medio de un algoritmo de intercambio, y todo esto mediante otro software de programación (Mathematica). Estos algoritmos proveen soluciones efectivas en el diseño de las rutas a visitar diariamente por una flota de buses homogénea.

Palabras Claves: Localización, Ruteo vehicular, logística

Abstract

This paper presents the approach and solution to the problem of the location of bus stops and transfer of staff working at a company located on the outskirts of the city of Guayaquil, which has been divided into two stages. In the first stage is proposed integer programming model for locating the whereabouts using a very important tool as it is Gams, followed by the design of routes in the second stage by means of a heuristic and then improve the solutions found by an exchange algorithm, and all this through another software program (Mathematica). These algorithms provide effective solutions in the design of routes to visit daily for a homogeneous fleet of buses.

Keywords: Location, Vehicle routing, logistics.



1. Introducción

En este proyecto se han aplicado las distintas técnicas utilizadas de la investigación de operaciones para poder determinar la solución a un problema de recolección de personas y trasladarlas a su lugar de trabajo. Las técnicas aplicadas permiten determinar los paraderos de entre un conjunto de posibilidades de ubicación, y las respectivas rutas para el recorrido de los buses necesarios en el traslado del personal. Este problema que hemos abordado ha sido dividido en dos etapas para su resolución, una que consiste en la localización y otra en el ruteo vehicular. En la primera etapa se formula un problema de programación entera para la localización de paradero. Es necesario plantear y solucionar el problema de localización de paraderos en primera instancia ya que este servirá como datos para la solución al problema del ruteo de vehículos.

2. Descripción del problema

Actualmente, la empresa cuenta con una flota 13 buses con capacidad para 45 personas que cubren un número de rutas determinado, estos buses son proporcionados por una empresa tercera mediante un contrato establecido, que pone a disposición los buses y el personal de servicio, mientras que la empresa que tomamos para nuestro estudio es la encargada de diseñar las rutas.

Los buses están encargados de recoger el personal de trabajo que se dirige a las instalaciones de la empresa y que no tengan la facilidad de llegar a la misma debido a que ésta queda ubicada a las afueras de la ciudad de Guayaquil, el personal de planta trabaja 6 días a la semana en dos turnos fijos en el horario de 7:00 a 15:00 y de 15:00 a 23:00. El personal administrativo en un solo turno desde las 08:00 hasta las 17:00, en nuestro caso tomaremos en cuenta solo el personal de planta del turno de 7:00 a 15:00, el personal administrativo lo hemos excluido dado que en su mayoría ellos se movilizan en transporte propio o con algún compañero. Este sistema de recolección de personal debe considerar factores, tales como el número de empleados, el lugar donde vive cada uno, las vías de acceso, es decir que tan fácil o difícil es trasladarse desde el lugar donde vive hasta un posible paradero, la zona en la que vive y el tráfico.

El sistema de transporte presenta ciertos inconvenientes, en primer lugar para los empleados debido a que para algunos les resulta un poco difícil trasladarse a alguna de las calles por donde los buses asaban por la distancia a la que se encontraban o las vías de acceso a la misma, estas rutas fueron

establecidas por la misma empresa sin un estudio previo. En segundo lugar, el problema se trasladaba a la distancia que tenían que recorrer los buses por la misma razón de no haber realizado un estudio previo.

Otro inconveniente se presentaba al momento de recoger el personal de trabajo ya que los buses no tenían un lugar fijo de recolección, estos tenían que hacer muchas paradas, en algunas ocasiones tenían que parar hasta dos veces en una misma cuadra.

2.1 Localización de paraderos.

Para solucionar el problema de localización de paraderos primero, se procedió a realizar una encuesta tipo formulario para los empleados del turno de 7:00 a 15:00 en el cual nos interesaba saber las personas que utilizaban el medio de transporte proporcionado por la empresa y la dirección del lugar donde vive cada uno de ellos, para así poder calcular las coordenadas en latitud y longitud. Esto nos ayudó a ver cómo está distribuido el personal de trabajo dentro de la ciudad de Guayaquil. Luego de esto se analizó dicha distribución y procedimos a ubicar los paraderos según la concentración de personas en las distintas zonas, considerando como restricción que los paraderos estén ubicados en calles donde la circulación de los buses sea de fácil acceso. Era indispensable ubicar una cantidad considerable de paraderos para que el programa luego nos diga cuales son a los que les asigna más personas.

2.2 Ruteo Vehicular.

Una vez encontrados nuestros paraderos que nos servirán como nodos para poder realizar nuestro problema de ruteo vehicular tomando como nodo de origen el lugar de donde parten los buses que en este caso sería la empresa que estamos tomando para el estudio, podemos enfocarnos en el diseño de las rutas.

Dado que se cuenta con una flota de vehículos con capacidad limitada esto nos dice que nos enfrentamos con un problema de ruteo vehicular capacitado (CVRP).

El problema de ruteo de vehículos capacitados más conocido como el Capacited Vehicle Routing Problema, CVRP por sus siglas en inglés es una de las variantes de la vasta familia de los problemas de ruteo de vehículos (VRP). En el CVRP se requiere encontrar las rutas que van a recorrer un conjunto de vehículos al visitar a una lista de clientes o nodos que en nuestro caso serían los paraderos sin sobrepasar su capacidad máxima. El objetivo es minimizar la distancia total recorrida por la flota de vehículos.



3. Características del problema

Como se ubicó una cantidad significativa de paraderos en zonas donde había una mayor concentración de personas, el siguiente paso fue minimizar ese número de paraderos de tal manera que se pueda dar un buen servicio hacia los empleados y al mismo tiempo reducir costos. Esto se lo modeló como un problema de asignación. Mientras que para el problema de ruteo de los buses se lo modeló como un problema del tipo CVRP.

3.1. Problema de asignación

El problema planteado consiste en asignar cada uno de los n empleados a alguno de los m paraderos, el costo en nuestro caso representaría la distancia c_{ij} a recorrer por cada empleado i a un paradero j establecido.

El objetivo es determinar la cantidad óptima de paraderos de tal manera que no se perjudique a los trabajadores.

3.2. Problema de ruteo vehicular

Un Problema de Ruteo de Vehículos consiste en: dado un conjunto de paraderos y un nodo inicial (punto de partida) con una flota de buses, determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en el nodo inicial [1], para que los buses visiten a los respectivos paraderos y trasladar al personal de trabajo

3.2.1. Algoritmo de Clark & Wright. El algoritmo de Clark & Wright o también conocido como el Algoritmo de ahorros, desarrollado por Clarke y Wright se basa en una idea muy simple: en conectar todos los nodos en pares con el nodo inicial, gráficamente esto se podría observar como si hubiera una ruta desde el nodo inicial hasta cada uno de los demás nodos, es decir si se tienen n nodos con excepción del nodo de inicio también se tendrá n rutas. Tomando esto como una solución inicial y previamente obteniendo una matriz datos, se procede a calcular una matriz de ahorros ya sea de costos, tiempos o distancias dependiendo del tipo de información que se tenga en la matriz de datos.

3.2.2. Algoritmo de mejora 2 opt. Este algoritmo de mejora lo que pretende dar es una mejor solución para una ruta dada. Básicamente, lo que se pretende lograr con este algoritmo es la eliminación de cruces entre los arcos que unen los puntos de una ruta. Para

ello, elimina dos arcos de la ruta e intenta reconectarlos de la mejor manera posible [2].

4. Planteamiento de la solución

Es muy importante la utilización de software de programación para la solución de problemas de este tipo, en el caso nuestro hemos utilizado dos software de programación avanzada y optimización matemática como lo son Mathematica y Gams respectivamente. La solución con Gams nos dio como resultado la asignación de las personas a ciertos paraderos, y la solución con Mathematica nos dio como resultado las rutas que deben seguir los buses.

4.1. Aplicación del problema de asignación

Resolviendo nuestro problema de asignación con una herramienta de mucha ayuda como lo es GAMS, hemos obtenido los primeros resultados que corresponden a la distribución de personas en los distintos paraderos ubicados en la ciudad de Guayaquil. Resolviendo este problema nos dio como resultado que un total de 29 paraderos serán abiertos.

4.2. Aplicación del algoritmo de Clark & Wright

La programación del algoritmo de Clark y Wright fue realizada en el software Mathematica realizando una conexión con la base de datos de los paraderos obtenidos con su respectiva cantidad de empleados. Para la implementación de este algoritmo debíamos tener en cuenta los datos necesarios que importaríamos de nuestra base de datos que luego ingresarían al software y así poder tener nuestros primeros resultados en cuanto a las rutas. Las distancias fueron calculadas a partir de las coordenadas geográficas de cada uno de los paraderos y aplicando nuevamente la fórmula de Manhattan se obtuvo las distancias.

A partir de las distancias calculadas nuestro programa generó las rutas mínimas para la visita a cada paradero y recolección del personal de trabajo, tomando en cuenta la capacidad de los buses que en este caso serían de 45 personas.

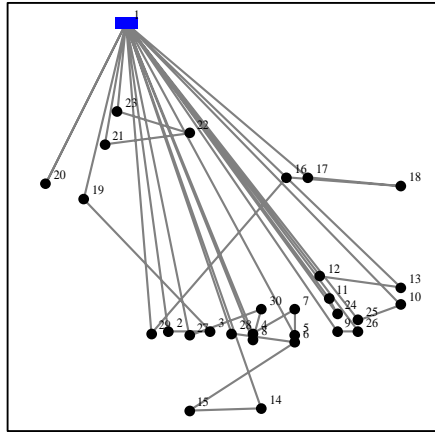


Figura 4.1. Grafo del ruteo vehicular

Todos las rutas parten de la planta hacia los distintos paraderos de la ciudad de Guayaquil, como podemos ver en el grafo de la Figura 4.1 se generan un total de 11 rutas esto nos quiere decir que utilizaremos un total de 11 buses, en la Tabla 4.1 se detallan los resultados obtenidos por el algoritmo de Clark y Wright.

Tabla 4.1. Resultados con Clark & Wright

Rutas	Paraderos	Distancia (km)	Personas	Capacidad Bus
Ruta 1	1,20,1	16,35	33	35
Ruta 2	1,9,26,1	46,41	44	45
Ruta 3	1,10,25,1	46,39	43	45
Ruta 4	1,11,24,1	43,97	40	45
Ruta 5	1,5,7,4,1	44,46	41	45
Ruta 6	1,14,15,6,28,1	55,61	41	45
Ruta 7	1,12,13,1	42,2	42	45
Ruta 8	1,8,30,27,1	43,95	43	45
Ruta 9	1,17,18,16,29,1	47,6	42	45
Ruta 10	1,2,3,19,1	37,55	44	45
Ruta 11	1,21,22,23	16,8	41	45

4.3. Aplicación del algoritmo 2 opt

El algoritmo de Clark y Wright nos da una solución factible y cercana al óptimo dado que es una heurística. Estadísticas muestran que este algoritmo nos da un resultado a un 20% del óptimo, es por esto que existen varias técnicas para mejorar estos resultados y llegar a una respuesta más cercana a la óptima. En nuestro caso hemos elegido trabajar con el algoritmo de mejora 2 opt. Este parte de una solución inicial, entonces tomaremos como solución inicial cada una de las rutas con excepción de las que están involucradas 1 o 2 nodos, es decir se aplicara este

algoritmo individualmente a 11 rutas. Este algoritmo es comúnmente aplicado al TSP pero dado que cada ruta del VRP es en sí un TSP sería una estrategia válida de post optimización. En la tabla 4.2 se muestra el intercambio realizado.

Tabla 4.2. Aplicación del algoritmo 2 opt

Ruta	Paraderos	Distancia (km)
Ruta 1	1,20,1	16,35
Ruta 2	1,9,26,1	46,41
Ruta 3	1,10,25,1	46,39
Ruta 4	1,11,24,1	43,97
Ruta 5	1,7,5,4,1	43
Ruta 6	1,15,14,6,28,1	51
Ruta 7	1,12,13,1	42,2
Ruta 8	1,30,8,27,1	42,5
Ruta 9	1,16,17,18,29,1	46
Ruta 10	1,3,2,19,1	37,3
Ruta 11	1,21,22,23,1	16,8

Las rutas subrayadas con un color distinto en la tabla 4.2 representan los intercambios que se realizaron aplicando el algoritmo de mejora.

4.4. Resultados

Habíamos explicado anteriormente que la empresa contratada a la flota de buses de una tercerizadora, y la empresa se encarga de establecer las rutas y los buses que desean en cada recorrido. En la mayoría de rutas los buses son ocupados entre un 89% y 97%, utilizando los buses de 45 personas de capacidad, pero para la ruta 1 que visitara solamente el paradero 20 en el cual hay 33 personas asignadas, no sería factible enviar un bus de 45 personas. Entonces para esta ruta se enviará un bus de capacidad para 35 personas. Una vez realizados todos nuestros cálculos hemos llegado al final de nuestro problema y hemos obtenidos ciertos resultados, pero para saber si mejoraron o no es necesario hacer una comparación con la situación actual de la empresa.

Tabla 4.3. Situación actual de la empresa

Situación Actual	
Buses	13
Distancia Total	720.28 Km



Tabla 4.4. Propuesta presentada

Propuesta	
Buses	11
Distancia	431.92 Km

5. Agradecimientos

Queremos aprovechar la ocasión y este espacio para testimoniar y reiterar nuestro sincero agradecimiento y gratitud a las personas que contribuyeron para la realización de este artículo, que sin sus consejos no hubiese podido llevarse a cabo, también a nuestras familias que entregándonos amor, paciencia y todo su apoyo nos han acompañado en cada etapa de nuestras vidas.

6. Referencias

- [1] **Heurísticas para el ruteo de vehículos**
[En línea], por Alfredo Olivera. Disponible en:
<http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliotel>
- [2] **Salazar Gonzales Juan José**
Programación Matemática, Ed. Díaz Santos S.A,
2001, página 378-379.

7. Conclusiones

- Este trabajo que hemos presentado propone una combinación de un modelo de programación entera para la ubicación de paraderos y un modelo de ruteo vehicular para el diseño de las rutas para la recolección del personal de trabajo, implementados informáticamente como sistema de soporte de decisiones en este ámbito logístico, los resultados arrojados muestran un equilibrio entre servicio hacia el empleado y el ahorro de costos. El servicio o trato al empleado es de mucha importancia para una empresa, estos son principios de administración de empresas en el que se resalta que un buen trato hacia el empleado será recompensado con mayor esfuerzo laboral por parte de él.
- La solución proporcionada con la implementación de nuestro algoritmo nos dio como resultado una reducción en el número de buses que actualmente utiliza la empresa y una disminución en la distancia total

recorrida por todos los buses igual a 288.86 km.

- Al momento de resolver el problema de ruteo vehicular pudimos darnos cuenta que pueden existir ciertas variantes de este problema de recolección de personal si bien es cierto este es un modelo general que podría ser aplicado a cualquier empresa que este a afueras de la ciudad pero hay ocasiones en la que los empleados de una empresa tienen una rotación de horarios cada cierto periodo de tiempo, esto conllevaría a otro tipo de modelo matemático.
- Debido a que el problema planteado es considerado NP complejo, se ha utilizado una heurística para encontrar una solución al problema del ruteo de buses que posteriormente se la mejoró por medio de un algoritmo de intercambio, estas técnicas resultarían en una solución que permite obtener un gran ahorro con respecto a la situación actual.
- En la programación del algoritmo de Clark & Wright se utilizó una cota máxima para la selección del nuevo par de nodos a partir de la iteración 160, es decir si el nuevo máximo ahorro pertenecía al par de nodos (3,5), y estos aun no pertenecía a ninguna ruta, este era seleccionado como una nueva ruta siempre y cuando el recorrido no sea mayor a 45 km.
- Para conseguir una mejor solución que la proporcionada por el algoritmo de mejora dos 2 opt, se realizó una exploración exhaustiva para cada una de las rutas resultantes generadas en un comienzo con el algoritmo de Clark & Wright, como resultado se obtuvo que la solución proporcionada con el algoritmo de mejora 2 opt fue la óptima en todas las rutas en que fue aplicado ya que la exploración exhaustiva no mejoró dichas soluciones.