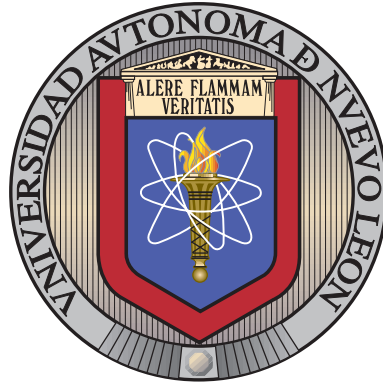


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



LOCALIZACIÓN DE PARADAS Y DISEÑO ÓPTIMO DE
RUTAS PARA TRANSPORTE DE PERSONAL

POR

LUIS CARLOS LUNA LÓPEZ

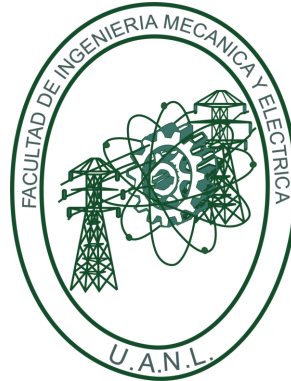
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO
CON ORIENTACIÓN EN DISEÑO Y ANÁLISIS

MAYO 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



LOCALIZACIÓN DE PARADAS Y DISEÑO ÓPTIMO DE
RUTAS PARA TRANSPORTE DE PERSONAL

POR

LUIS CARLOS LUNA LÓPEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO
CON ORIENTACIÓN EN DISEÑO Y ANÁLISIS

MAYO 2015

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Localización de paradas y diseño óptimo de rutas para transporte de personal», realizada por el alumno Luis Carlos Luna López, con número de matrícula 1291777, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro con orientación en Diseño y Análisis.

El Comité de Tesis

Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez

Asesor

Dr. Miguel Mata Pérez

Revisor

MSc. Vicente Alberto Díaz Salas

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, mayo 2015

DEDICATORIA

A mis padres:

*Guillermo Luna Flores y Graciela López Castilleja por el cariño, comprensión y apoyo
que sólo ustedes pueden brindar.*

A mis hermanos:

*Guillermo Luna López y Myrna Luna López que siempre han confiado en mi y me han
dado el mejor ejemplo.*

A mi abuela Dominga, un ejemplo de lucha y perseverancia.

A Rut, por tener mucha paciencia y amor en adversidades.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	IV
Agradecimientos	XII
Resumen	XIII
1. Introducción	1
1.1. Objetivo	2
1.1.1. Objetivos específicos	2
1.2. Justificación	3
1.3. Hipótesis	3
1.4. Estructura de la tesis	4
2. Antecedentes	5
2.1. El transporte y su importancia en la economía	5
2.2. El transporte en Monterrey	9
2.3. Ruteo de Vehículos (<i>VRP</i>)	12

2.3.1. Los clientes	12
2.3.2. Los depósitos	13
2.3.3. Los vehículos	13
3. Revisión de la literatura	16
3.1. Introducción a la modelación	16
3.2. Estructuración matemática	18
3.3. El Problema del Agente Viajero (<i>TSP</i>)	19
3.4. Ruteo de Vehículos Capacitado (<i>CVRP</i>)	20
3.5. Ruteo con Ventanas de Tiempo (<i>VRPTW</i>)	21
3.6. Ruteo de vehículos capacitado; mín-máx <i>VRP</i>	23
3.7. Trabajos relacionados con <i>VRP</i>	24
3.8. Métodos de solución propuestos	26
3.8.1. Algoritmos exactos	26
3.8.2. Algoritmos aproximados	26
4. Descripción del problema	28
4.1. Descripción de la situación actual	29
4.2. Estudio de localización de nodos	33
4.2.1. Ubicación geográfica de los clientes	33
5. Formulación matemática del problema	35

5.1. Introducción	35
5.2. Características generales del problema	36
5.3. Suposiciones del modelo	37
5.4. Modelación matemática del problema	38
5.4.1. Notación del problema	38
5.4.2. Parámetros	38
5.4.3. Variables de decisión	39
5.5. Función objetivo	39
5.6. Restricciones	39
6. Conclusiones	41
6.1. Conclusiones generales	41
6.2. Contribuciones	41
6.3. Trabajo futuro	42
A. GAMS	43
A.1. Generalidades de <i>GAMS</i>	43
A.2. Generalidades de <i>Cplex</i>	44
A.3. <i>GAMS/Cplex</i>	46
B. Resultados del estudio	48
B.1. Horas de descanso de los usuarios	48

B.2. Registro de horas de llegada de los autobuses promedio	50
B.3. Gráfico comparativo de llegadas	50
C. Ruteos de nuevos trayectos acorde a experimento	51
C.1. Resumen general de nuevos trayectos	51

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Movilidad en un plano tendencial.	8
2.2. Encuesta sobre el medio de transporte.	10
2.3. Representación clásica del VRP	14
3.1. Una solución formada por 2 subciclos	20
3.2. Representación clásica del VRP con ventanas de tiempo.	22
4.1. Recorrido actual de la ruta Casa Blanca.	30
4.2. Recorrido actual de la ruta Colón.	31
4.3. Recorrido actual de la ruta San Roque.	31
4.4. Recorrido actual de la ruta Lincoln.	32
4.5. Interfaz de la programación HTML para la obtención de coordenadas. . .	33
4.6. Topología del número de usuarios en Nuevo León.	34
6.1. Aplicación en dispositivo móvil.	42
B.1. Descanso de usuarios: correlación directa a la fatiga.	49
B.2. Horas de llegada en promedio antes y después del ajuste.	50

B.3. Cantidad de demoras antes y despues del ajuste.	50
C.1. Rediseño de la ruta Colón.	52
C.2. Rediseño de la ruta San Roque.	52
C.3. Rediseño de la ruta Casa Blanca.	53
C.4. Rediseño de la ruta Lincoln.	54

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Análisis del problema frente a variantes del VRP.	25
4.1. Relación de usuarios y la capacidad del vehículo.	29
C.1. Resumen final, eliminando ruta extra.	51

AGRADECIMIENTOS

Primero, agradecer a Dios por abrirme las puertas siempre en modo positivo y nunca soltar de mi mano en momentos difíciles.

Además, quiero agradecer a mis compañeros que a pesar de dificultades nunca nos dejamos de apoyar : Lucy, Gaby, David y Paco.

A mis muchachos de batalla, sobretodo a mi primo Ángel y a Julián, que depositan su confianza y fé en un servidor.

A toda mi plantilla de trabajo: Vicente Diaz, que en tiempos de crisis siempre estuvo ahí, introduciendome al mundo de L^AT_EX; al futuro ingeniero Daniel Pérez por su apoyo incondicional; a la futura ingeniera Marisol A. Huerta, que positivamente me motivaba a seguir adelante.

También, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Dra. Jania Astid Saucedo Mtz. quien es parte importante en la realización de este proyecto, como asesora de tesis, por brindar parte de su valioso tiempo y sus conocimientos, además de dar apoyo con gran entrega.

Quiero agradecer al Dr. Miguel Mata por su apoyo con L^AT_EXy sus consejos para la realización con éxito de esta tesis.

Analógicamente, doy gracias a FIME especialmente a la carrera de Logística y Cadena de Suministro y a la UANL, por el apoyo en becas, apoyo en trámites e inscripciones y sobretodo por dejarme ser parte de la historia como alumno de la gran FIME.

RESUMEN

Luis Carlos Luna López.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro con orientación en Diseño y Análisis.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: LOCALIZACIÓN DE PARADAS Y DISEÑO ÓPTIMO DE RUTAS PARA TRANSPORTE DE PERSONAL.

Número de páginas: 58.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo del presente trabajo es estudiar el problema de ruteo de vehículos (*vehicle routing problem*, *VRP*, por sus siglas en inglés), en el cual se incorpora la minimización del tiempo máximo de traslado y como consecuencia, lograr compactar las cargas al máximo de la capacidad de cada vehículo. Al hacer una exhaustiva revisión de la literatura del problema de ruteo de vehículos, se evidenció que el tiempo de servicio es un objetivo que se ha estudiado poco y, acorde a las necesidades de nuestro proyecto, analizaremos éste factor, para obtener la minimización del trayecto con mayor tiempo. Por consiguiente, en este trabajo se definió el tiempo de servicio como el tiempo que una ruta realiza desde el inicio, pasando por todos los nodos potenciales hasta el depósito.

El problema surge de la necesidad que una empresa manufacturera del giro hulero presenta para decidir la localización de las paradas del transporte de personal, el cuál se busca satisfacer la demanda de sus clientes y la comodidad de los mismos.

Para la caracterización del problema de ruteo de vehículos, con depósito final de los pasajeros a su trabajo, se desarrollará un modelo de programación entera mixta el cual se implementará en *GAMS* y se esperan resultados prometedores considerando el tiempo de servicio y la capacidad de los vehículos.

El objetivo es minimizar el tiempo máximo de traslado de la demanda de dichos clientes en sus respectivas rutas hacia el depósito. En los últimos años el tema del estudio de problemas de ruteo de vehículos ha tomado gran importancia para las empresas ya que el costo del transporte, tanto en la industria como en el sector de servicios, representa una porción importante en el valor final del producto o del servicio ofrecido.

En esta investigación se estudia una variante del *VRP* en la cual se considera como objetivo principal la reducción del tiempo máximo de servicio limitado por la capacidad del vehículo, logrando como consecuencia el equilibrio entre la carga de trabajo de cada vehículo o empleado. Este problema está clasificado dentro de los problemas de ruteo de vehículos multi-objetivo dado que se va a minimizar el tiempo máximo de traslado y forma parte de una variante del ya conocido Problema de Ruteo de Vehículo Capacitado (*capacitated vehicle routing problem, CVRP*, por sus siglas en inglés). Esta variación ha sido relativamente poco estudiada en la literatura y usualmente se maneja como carga de trabajo el tiempo recorrido por cada vehículo, en esta investigación el tiempo de servicio se entenderá como el tiempo máximo que una ruta puede recorrer, aunado a su capacidad de carga.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES :El enfoque principal de este proyecto fué el de adaptar una comodidad al usuario del transporte en paralelo con el tiempo de servicio acotado al mínimo. La contribución principal de este proyecto fue de eliminar **un autobús** impactando directamente en el costo de la empresa, en donde se tomó en cuenta cubrir a todos los usuarios, mejorando tiempos de llegada, cantidad de personas por autobús

además de mejorar el rendimiento de operación disminuyendo los niveles de fatiga de cada usuario, reflejándose en la productividad de la compañía.

Firma del asesor: _____

Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El diseño de un sistema de transporte en autobuses para el personal representa una actividad importante dentro de la logística del proceso productivo de una empresa a las orillas del área metropolitana de Monterrey.

Decidir adecuadamente donde se localizarán las diferentes paradas y que ruta seguirá cada autobús contribuirá a mejorar las ventajas competitivas para la organización e incluso reducir externalidades como la congestión de rutas y la disconformidad de los mismos usuarios ante un mal servicio que pueda afectar en el desempeño laboral, así como conflictos sindicales o ausentismo.

En el presente trabajo empleamos herramientas propias de la investigación de operaciones para abordar de manera eficiente un problema de traslado de personal a su lugar de trabajo.

El problema contempla la selección de las paradas de cada autobús y la ruta que debe realizar para cumplir con las paradas programadas. La metodología adoptada consiste primeramente en la formulación de un modelo que se basa en la programación entera mixta que considera el problema de manera integral. El modelo propuesto basado en la minimización del tiempo máximo de servicio, ayudará a determinar las paradas de detención de entre un conjunto de potenciales alternativas y, simultáneamente, determinar las respectivas rutas para el recorrido de los autobuses necesarios en dicho traslado, en base

a la localización de cada usuario, detectando las coordenadas y puntuando los domicilios en el mapa con ayuda del lenguaje de programación *JavaScript* a través de la *API by Google*¹. Esta plataforma proporcionada por *Google* nos ayudará a la geolocalización de cada usuario, además de determinar las distancias de cada parada al depósito (lugar de trabajo) realizando el trabajo de manera concisa.

1.1 OBJETIVO

Diseñar un modelo de transporte, con restricciones de capacidad y tiempo de servicio, que optimice el costo total del transporte y acapare toda la demanda dentro del diseño de la red.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Formular un modelo matemático que caracterice el problema general de ruteo de vehículos con capacidad limitada y tiempo de recorrido, cuando los tres objetivos que se persiguen es la minimización de costo-distancia-tiempo y equilibrar la carga entre empleados entendiendo por carga la cantidad de artículos a entregar o el número de clientes a visitar.
- Proponer un enfoque de solución al problema basado en el *CVRP*.
- Colocar patrones medibles antes y después de la solución; la fatiga, productividad laboral, horas de descanso por usuario y calidad del servicio de transporte.

¹The Computer Language Company Inc.1981-2015. La *API (Application Programming Interface)* son un conjunto de rutinas, protocolos y herramientas para la construcción de aplicaciones de *software*. La *API* expresa un componente de software en términos de operaciones, entradas, salidas y tipos subyacentes.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El sistema de transporte en estudio presentaba de hecho algunas dificultades que motivaron el presente trabajo, tales como: la inexistencia de paraderos definidos en el recorrido de los autobuses (que genera muchas detenciones/ruteos no óptimos), una baja utilización de algunos autobuses contratados y la redundancia en la cobertura de algunos recorridos, todo lo cual implica una utilización ineficiente de los recursos que se esperaba explorar y mejorar con el empleo de alternativas metodológicas de la investigación de operaciones como las descritas en este trabajo.

Existen 4 rutas (Colón, San Roque, Casa blanca, Lincoln) para los horarios 7:00 am y 7:00 pm. Las áreas de oportunidad encontradas en el estudio, fueron las siguientes:

- La utilización pobre de la ruta Casa Blanca.
- La sobre capacidad de las rutas Colon y San Roque.
- El doble trayecto de la ruta San Roque.
- El tiempo de inicio desde el origen y llegada al mismo (muy temprano, muy tarde).
- El diseño actual incluye nodos (paradas) en donde no existe demanda.
- La ultima actualización del ruteo de en 2008 (en donde personal fue cambiando de residencia, algunos ya no colaboran en la empresa y otros son nuevos).
- El personal tiende a viajar de pie y a esperar mucho tiempo por el autobús.

1.3 HIPÓTESIS

Mediante un modelo de ruteo vehicular teniendo como base el VRP, determinaremos una red de transporte. Determinando las paradas de detención, con ayuda de la georeferenciación, de entre un conjunto de potenciales paradas y definiendo la ruta respectiva de cada

autobús, se minimizará el tiempo máximo de traslado, éste a su vez tomando en cuenta las principales restricciones del problema, como son atender íntegramente los requerimientos de demanda por traslado y respetar la capacidad de los autobuses disponibles.

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La organización de este trabajo se presenta en capítulos. En este capítulo, el primero, se describe el objetivo y justificación bajo las que se realizó este trabajo; continuando con el capítulo dedicado a los antecedentes logísticos y matemáticos que abarcan el caso, además de los posibles problemas donde puede ser empleado el procedimiento propuesto.

En el capítulo 3 presentamos una revisión de la literatura, específicamente en los modelos relacionados al problema a tratar, además, de revisar los métodos de solución propuestos.

En el capítulo 4, describremos el problema de la empresa, desglosando la situación actual, teniendo una óptica general del problema, la descripción de los caminos de las rutas actuales, aunado a las diversas dificultades implicadas en el tema.

Posteriormente, en el capítulo 5, presentamos la formulación matemática del problema, los diferentes supuestos y restricciones que abarcan al mismo.

Para finalizar este trabajo, el capítulo 6 contiene las conclusiones, contribuciones y trabajo futuro.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

En [2], Ballou menciona que el transporte representa el medio individual más importante en los costos de logística, en la mayoría de las empresas. Sólo se necesita comparar las economías de una nación «desarrollada» con las de una «en desarrollo» para ver la participación que tiene el transporte en la creación de un nivel alto de actividad económica. Un servicio de transporte es un conjunto de características de desempeño que se adquieren a determinado precio, donde precio significa la tarifa de transporte de línea para el desplazamiento de bienes y cualquier cargo accesorio o terminal por servicio adicional proporcionado.

Es importante determinar la economía de un país, revisar el mercado y sus volúmenes de demanda y estudiar a detalle cada punto crítico para la gestión del transporte. En la siguiente sección detallaremos de la importancia de la economía del transporte, los antepasados y la estructura que se ha formado a través de los años en cuanto a este servicio.

2.1 EL TRANSPORTE Y SU IMPORTANCIA EN LA ECONOMÍA

El transporte es el medio de traslado de personas o bienes desde un lugar hasta otro. El transporte comercial moderno está al servicio del interés público e incluye todos los

medios e infraestructuras implicados en el movimiento de las personas o bienes, así como los servicios de recepción, entrega y manipulación de tales bienes.

Desde tiempos del imperio romano, la península Ibérica contó con una red de calzadas romanas que ha tenido una enorme importancia en la configuración de mapas geográficos y administrativos de diferentes países [15]. En América Latina, ya en el período precolombino los incas poseían un rudimentario pero creciente sistema de caminos interconectados a lo largo y ancho de su imperio, por el que transportaban distintos tipos de mercaderías. A pie o a lomo de llamas, sus mercaderías lograban llegar a su destino, a veces atravesando puentes de cuerdas entre las montañas. El caballo, la mula y el transporte sobre ruedas fueron introducidos por españoles y portugueses, que a su vez aprovecharon las rutas construidas por los indígenas. El transporte por tierra se desarrolló más despacio. Durante siglos, los medios tradicionales de transporte, restringidos a montar sobre animales, carros y trineos tirados por animales, raramente excedían de un promedio de 16 km/h. El transporte terrestre mejoró poco hasta 1825 [11], año en el que el ingeniero británico George Stephenson adaptó un motor de vapor a una locomotora e inició, entre Stockton y Darlington, en Inglaterra, el primer ferrocarril de vapor.

A principios del siglo XX, la mejora de las carreteras denominadas autopistas, en las que las empresas privadas cobraban un peaje por haberlas construido, conectó todas las ciudades principales superando al resto de carreteras. En el siglo XX la formación e instalación de grandes corporaciones de fabricantes ha dado un gran impulso a la producción de vehículos impulsados por motores tanto para el uso particular como para el transporte público y de mercancías, así como la exportación a terceros países. Existen nuevas tecnologías como internet, las redes inalámbricas, coberturas satelitales que nos hacen pensar en las marcadas diferencias existentes entre las formas de transporte actual y sus antecesoras. También encontramos similitudes, existen vehículos, caminos, terminales y controles que son ajustados para realizar ciertas funciones básicas, los modos de transporte actualmente conocidos todos tienen capacidad de desplazarse, acelerar, frenar y cuentan con mecanismos para almacenar combustible o energía para funcionar, para poder diferenciar entre objetos y personas en las terminales, asignar y contener cargas de manera eficiente

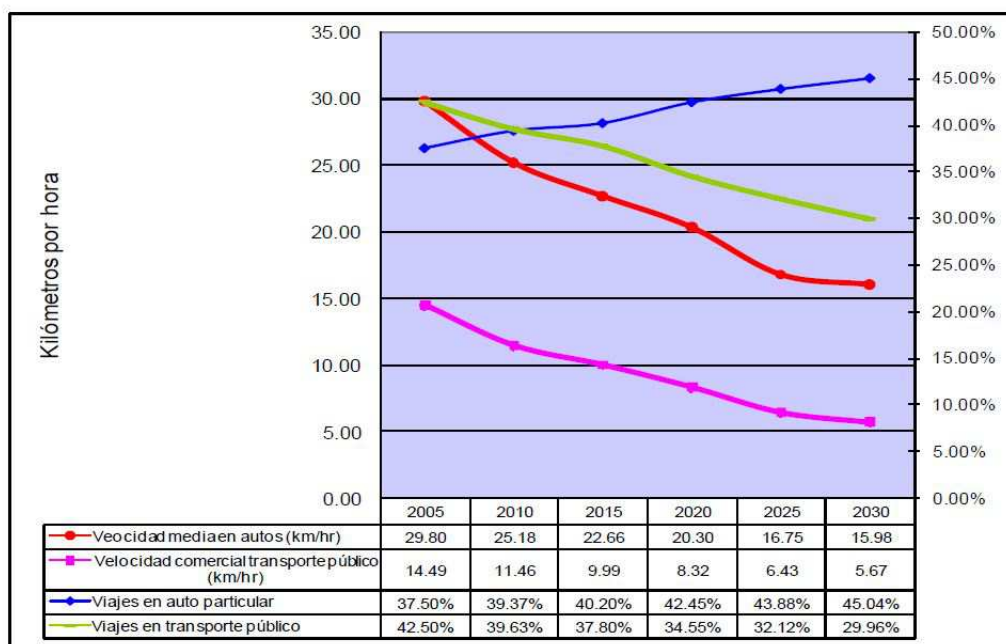
para ir de un lugar a otro.

Al paso de los años y de esta evolución de modos de transporte, el hombre ha reconocido en la ciencia del transporte que cualquier modo de transporte contiene los mismos elementos: vehículos, un camino por donde transitar y terminales operando bajo ciertas políticas de control. La clara definición de estos elementos es útil para estar de acuerdo en que sea cual sea el modo de transporte estos elementos básicos conservan sus propiedades. Los vehículos comprenden a todos los recursos móviles en las que pueden viajar personas o embarques de productos, proveen el espacio para hacer del viaje seguro y confortable. Los caminos son recursos ya establecidos como las carreteras y autopistas estos definen el camino físico que utilizaran los vehículos en su movimiento de un lugar a otro. Las terminales son los establecimientos estacionarios con la capacidad de organizar los viajes de personas objetos de acuerdo a su salida y entrada en las rutas de transportación. Por último la política de control se refiere a las reglas que rigen el movimiento y trayectorias de todo el sistema de transporte. La ciencia de transporte en parte describe el comportamiento del hombre y de los sistemas cuando toman decisiones de transporte y por otra parte prescribe la forma en que se debe tomar esa decisión optimizando como objetivo el transporte. Como consecuencia del andar diario las personas tienen un amplia gama de elecciones que son tomadas de acuerdo a la formación de hábitos, circunstancias y otras ocasiones por deliberación. La manera en que nos comportamos al conducir un vehículo, es decir, las decisiones rutinarias como la velocidad, la ruta y modo que seguimos para ir al lugar de trabajo o a la escuela, son decisiones de corto plazo, mientras que la forma en que elegimos donde habitar, trabajar y como se forman las ciudades en zonas comerciales habitacionales e industriales definen de manera colectiva una rama de la ciencia del transporte.

En México, en las ciudades de más de 100 mil habitantes, el 72 % de sus pobladores hacen uso del transporte público de pasajeros, por lo que sólo el 28 % de los habitantes ocupan vehículos particulares. A pesar de esto, entre 1965 y 1984, el número de automóviles registrados fue de 771 mil a 5 millones, mientras que el número de camiones de pasajeros pasó de 31 mil a 69 mil. La eficacia del transporte público varía mucho de

ciudad a ciudad y entre los medios de traslado; sin embargo, se observan algunas constantes: la primera es la presencia predominante del automóvil saturando las zonas céntricas y las principales intersecciones viales; la segunda es la persistencia de la insatisfacción del usuario debido a la deficiencia, incomodidad y baja calidad en el servicio, así como por el congestionamiento vial y la lentitud de los desplazamientos; y la tercera es la reducida participación del sector público como prestatario directo del servicio, con excepción de la ciudad de México, donde cubre cerca de la mitad de la demanda. En la figura 2.1, se explica el crecimiento del automóvil y el transporte público desde la década de los 70.

Movilidad en Escenario Tendencial



Fuente: Plan Sectorial de Transporte y Vialidad del Área Metropolitana de Monterrey 2008-2030, utilizando el modelo TRANUS que hace interactuar la movilidad con el desarrollo urbano.

Figura 2.1: Movilidad en un plano tendencial.

2.2 EL TRANSPORTE EN MONTERREY

Al inicio del siglo XIX, la ciudad de Monterrey contaba con el sistema de transporte colectivo de tranvías, los cuales permanecieron en circulación hasta ya bastante entrado el siglo XX, los últimos desaparecieron en los años 40. A partir de 1917 se inició en Monterrey el servicio de transportes de pasajeros por medio de autobuses, utilizando las llamadas «Julias» (minibuses), los cuales fueron sustituyendo a los medios de tracción animal o «mulitas» que siguieron vigentes varios lustros posteriores a la introducción de las «Julias». Desde las década de los años 30 empiezan a proliferar las empresas de transporte de autobuses urbanos [4].

Monterrey, capital de Nuevo León, ha sido una de las ciudades más industrializadas desde la época de los años 40, donde las empresas «Troqueles y Esmaltes», «Fundidora de Monterrey», «Cervecería Cuauhtémoc y FAMOSA», entre otras, crearon fuentes de empleo en donde el personal se veía en la necesidad de transportarse desde sus hogares hasta el lugar de trabajo. Actualmente, el transporte de personal forma parte del estilo de vida del capital humano en Nuevo León, dada la obligación a economizar debido a los aumentos en la gasolina, se busca con mayor frecuencia este servicio. En la figura 2.2, se muestran los diferentes medios de transporte, en donde el autobús encabeza el medio de traslado más utilizado.

A medida que las ciudades se desarrollan, el transporte se convierte en un problema creciente en cuanto a complejidad de infraestructura pública y privada, viendo involucrada la producción y desarrollo de este servicio público.

Debido a la complejidad del tráfico y de la estructura complicada de la ciudad de Monterrey y su área metropolitana, es necesario realizar estudios que determinen un buen diseño de red, al igual de cumplir con las expectativas del cliente y de todas las variantes que conlleva un problema de esta magnitud. Es por eso, que al paso de los años se han propuesto metodologías que ayudan a mitigar los impactos que deja una combinación de realidades como el tiempo de llegada al depósito, la cantidad de rutas, la capacidad de

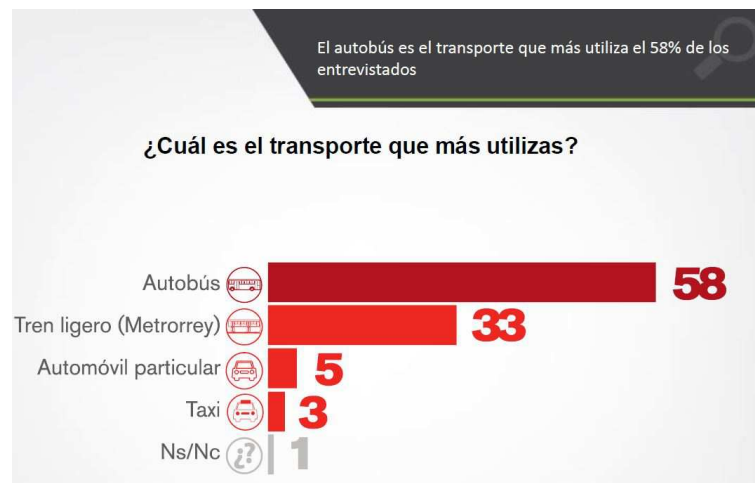


Figura 2.2: Encuesta sobre el medio de transporte.

Fuente: DINAMIA, Investigación social estratégica.

cada una de ellas, los caminos, las paradas, entre otras variables a considerar, dependiendo la naturaleza del problema y de las necesidades que éste requiera. Por eso, será necesario adentrar en la definición de modelos como el *VRP*, *CVRP* y otras variantes descritas en el siguiente capítulo a mayor detalle.

Uno de los problemas más estudiados de optimización y combinatoria es el *TSP* (*traveling salesman problem*) que consiste en visitar una vez un conjunto de clientes, partiendo de un punto inicial y finalmente retornando a éste, siguiendo una ruta de menor costo.

El *VRP* tiene planteamientos basados en *TSP* propuesto por Dantzig y Ramser¹[10] en 1959 es un problema importante para el transporte, distribución y logística. Lo que se plantea en este problema es que con una flota de vehículos con una determinada capacidad, se necesita despachar bienes situados en un depósito central para los clientes que han realizado pedidos de tales productos siendo visitados una sola vez con el objetivo de minimizar el costo de la distribución de las mercancías. Actualmente estos problemas

¹Dantzig y Ramser. Fueron los primeros autores del ruteo de vehículos en 1959, cuando estudiaron la aplicación real en la distribución de gasolina para estaciones de carburante. Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies June 2003, Volume 1, Issue 2, pp 149-153 The vehicle routing problem: A book review.

se resuelven de manera aproximada y de forma eficiente con adaptaciones de algoritmos aplicados al *TSP* mediante la incorporación de metaheurísticas.

Una de las ramificaciones del *VRP* es el problema clásico de ruteo de vehículos capacitado (*CVRP*) que bien, puede ser utilizado como base para el problema de vehículos de transporte de personal, y que en ambos se diseñan nodos estratégicos con límites de capacidad, balanceo y tiempo.

Se han propuesto varios métodos para solucionar el *VRP* y haciendo una pequeña introducción acerca de los métodos de solución, los cuales describiremos mas a detalle en el capítulo 3, podemos agrupar los métodos en exactos y aproximados.

Algoritmos exactos: dada la complejidad de los problemas, solo instancias con pocos clientes (hasta 50 aproximadamente) pueden ser resueltas con métodos exactos; normalmente, se resuelve el problema con un esquema de ramificación y poda o acotación, Branch & Bound.

Algoritmos aproximados: se clasifican a su vez en heurísticas y metaheurísticas.

Para este proyecto, nos basaremos en algoritmos exactos (en el que describiremos a detalle en el capítulo 3) dado que se tendrán las rutas previamente definidas y el número de usuarios no sobrepasará el total de la demanda de la empresa, además de tener definida la capacidad de cada vehículo y la ruta prediseñada.

En la sección 2.5 del presente capítulo, hablaremos de la historia del (*TSP* y cómo se fué desarrollando a través del tiempo hasta llegar a la descripción del problema que trataremos en esta tesis.

A manera introductoria, el *TSP* es considerado como un conjunto de grafos cuyas aristas son los posibles caminos que puede seguir la entidad para visitar todos los nodos [17], y cuyo algoritmo se puede representar de la siguiente manera:

Se debe definir el número de nodos, su posición y el costo por cada arista (i, j), dónde i denota la ciudad origen y j la ciudad destino. Debemos tener la lista de nodos

visitados, en paralelo, generamos la matriz C_{ij} , la cual denota la distancia o el tiempo de un punto a otro, importante para la optimización del problema.

2.3 RUTEO DE VEHÍCULOS (*VRP*)

El *VRP* surge por primera vez en 1959 cuando Dantzig y Ramser [10] realizan una formulación del problema para una aplicación de distribución de combustible. En este artículo ellos definen dicho problema como: «la determinación de la ruta óptima para una flota de vehículos que parten de uno o más depósitos (almacenes) para satisfacer la demanda de varios clientes dispersados geográficamente».

Años más tarde, Clarke y Wright en 1964 [6] desarrollaron el primer algoritmo efectivo para solucionar el *VRP*, conocido como el algoritmo de ahorros. A partir de ese momento el estudio de ruteo de vehículos ha crecido enormemente, tanto en la construcción de modelos que se acerquen más a la realidad como en la búsqueda de métodos de solución que sean cada vez más eficientes.

A grandes rasgos, el *VRP* consiste en, dado un conjunto de clientes y depósitos dispersos geográficamente y una flota de vehículos, determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en los depósitos, para que los vehículos visiten a los clientes. Las variantes del *VRP* son clasificados de acuerdo a las características de los clientes, depósitos y vehículos, así como diferentes restricciones operativas sobre las rutas, que explicaremos a continuación.

2.3.1 LOS CLIENTES

Cada cliente tiene cierta demanda que debe ser cubierta por algún vehículo, esta demanda puede ser determinística o estocástica. Entiéndase por cliente, como el usuario que utilizará una ruta determinada, en determinada parada.

En algunos casos, es posible que un mismo vehículo no pueda satisfacer la demanda de todos los clientes en una misma ruta. En otros casos la demanda no es un bien sino un servicio donde se da por cumplido el objetivo si el cliente es visitado por un vehículo, lo usual es que cada cliente deba ser visitado exactamente una vez, sin embargo, en ciertos casos se acepta que la demanda de un cliente sea satisfecha en momentos diferentes y por vehículos diferentes.

Otra característica relacionada con los clientes es que se puede tener restricciones asociadas al instante de tiempo en el cual se puede visitar al cliente (horario pactado). Usualmente estas condiciones se expresan como intervalos de tiempo conocidos como ventanas de tiempo.

2.3.2 LOS DEPÓSITOS

Los vehículos y los productos a entregar usualmente parten de un solo depósito y se tiene como condición que cada ruta definida comience y finalice en el depósito, sin embargo existen variaciones donde se tienen problemas que consideran problemas multi-depósito en los que cada depósito tiene características propias como lo son su ubicación y la capacidad máxima de almacenamiento. Cuando el vehículo no está obligado a regresar al depósito se tipifica un *open-VRP*, situación que se presenta en la vida real, por ejemplo, cuando el conductor es el mismo propietario del vehículo.

2.3.3 LOS VEHÍCULOS

La flota de vehículos puede ser homogénea o heterogénea en cuando a su capacidad, tipo de producto que puede transportar y el costo fijo en el que se incurre al usar cada vehículo. Se encuentran problemas con vehículos con capacidad limitada o ilimitada. Es posible encontrar restricciones sobre el tiempo máximo que un vehículo puede estar en circulación y en algunos casos se desea que la cantidad de trabajo realizado por

los vehículos (usualmente el tiempo de viaje) sea equilibrada entre ellos. En la figura 2.3,

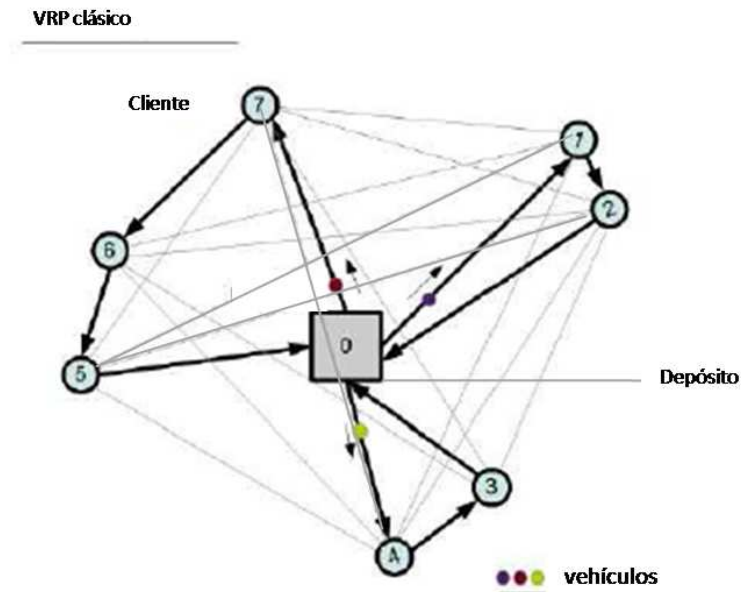


Figura 2.3: Representación clásica del VRP

Fuente: [6]

se representa el gráfico clásico del *VRP*, dónde se muestran las características típicas de un problema, tales como: los clientes, depósitos y los vehículos.

Acorde a Jozefowicz [18] existen otros componentes importantes al definir un problema de ruteo como lo son: el tipo de red y los objetivos que se pretenden optimizar. En cuanto al tipo de red [20] se clasifican los problemas en problemas de cubrimiento de nodos o problemas de cubrimiento de arcos, este estudio se concentra en el problema de cubrimiento de nodos ya que la ejecución de la tarea (entrega de artículos) se realiza en los nodos.

Pensando ahora en el tipo de objetivos que se persiguen en el problema se encuentra que pueden ser múltiples y diversos. Por un lado es posible que se busque minimizar el costo total, el tiempo total o la distancia total recorrida y por otro lado maximizar la calidad del servicio o los beneficios obtenidos con el cobro a los clientes.

En este capítulo se logró comprender la teoría básica del ruteo de vehículos y sus

diferentes características, dejando claro la estructura con la que se trabajará en este proyecto y haciendo un preámbulo para describir con detalle los modelos a utilizar, los cuales se explicarán en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 3

REVISIÓN DE LA LITERATURA

En este capítulo se detallará la teoría en la que se basa nuestra tesis para la solución de nuestro problema, explicando brevemente que se entiende cuando hablamos de ruteo de vehículos y que otro tipo de variantes tiene éste modelo.

3.1 INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN

Un modelo es una representación matemática simplificada de una realidad compleja. Modelar es la acción de construir un modelo, de encapsular la realidad. Implica la relación entre dos figuras (no necesariamente inmersas por personas únicas sino por equipos): el modelador (encargado de la especificación y desarrollo del modelo) y el experto sobre la realidad (conocedor del problema real). La mayoría de las veces, el desarrollo de un modelo puede involucrar a un equipo multidisciplinario compuesto por matemáticos, estadísticos, ingenieros, economistas, psicólogos, etc. que aportan diferentes perspectivas y conocimiento en la representación de la realidad.

Un modelo debe equilibrar la necesidad de contemplar todos los detalles con la factibilidad de encontrar técnicas de solución adecuadas. Un modelo es, en definitiva, una herramienta de ayuda a la toma de decisiones. Por esta razón, sus resultados deben ser claros y útiles. Modelar se puede entender a la vez como ciencia y como arte. Es una

ciencia pues se basa en un conjunto de procesos estructurados: análisis y detección de las relaciones entre los datos, establecimiento de suposiciones y aproximaciones en la representación de los problemas, desarrollo o uso de algoritmos específicos de solución. Es un arte porque materializa una visión o interpretación de la realidad no siempre de manera posible. Cada persona coloca su estilo en el modelo mismo y en la especificación, en el desarrollo y en la documentación. Características tales como elegancia o simplicidad pueden atribuirse a un modelo. El desarrollo de un modelo es una creación hecha con ayuda de ciencias básicas o herramientas de apoyo. Entre los beneficios explícitos o implícitos, tanto para el modelador como para el experto, derivados del proceso de modelado además del modelo en sí mismo, se pueden mencionar:

- Ayuda a establecer un diálogo con intercambio de información entre el modelador y el experto.
- Organiza los datos, la información disponible sobre el sistema.
- Organiza, estructura y mejora la comprensión del sistema.
- Analiza la estructura organizativa de la empresa.
- Permite compartir supuestos y resultados entre el modelador y el experto.
- Proporciona un entorno ágil para el análisis y la sensibilidad.
- Indica la dirección de mejora en las decisiones.

Del análisis se obtuvieron modelos matemáticos preliminares para dar solución a los problemas encontrados durante el análisis del sistema de transporte. Se propone el uso de técnicas de la investigación de operaciones para dar solución a tales modelos obtenidos.

Primeramente, existe un problema de programación de viajes, que llevan cierto tiempo. En la información recabada en esta empresa la cual presenta el problema expuesto en la introducción de este capítulo. Recordemos que este problema consiste en la optimización de rutas y selección de nodos precisa dentro de una red de distribución compuesta por lo menos por 4 trayectos y un depósito final en el lugar de trabajo del usuario.

En nuestra modelación, participarán restricciones de tiempo de servicio para el trayecto total de cada autobús. En el desarrollo de los modelos de optimización que representarían la realidad del problema, por la gran y variable existencia de trabajos que tratan el problema del ruteo de vehículos con capacidad, se pensó que se podría adaptar alguno de los modelos ya existentes, sin embargo, con el estudio más profundo de estos modelos se observó que las suposiciones que los investigadores tomaron en la mayoría de los casos no representaban las mismas suposiciones para nuestro problema. El objetivo de este trabajo es crear un modelo que considerara los supuestos presentados por ésta empresa. El modelo se fue construyendo en un proceso de evolución hasta llegar al modelo que representa lo más adecuado posible a la situación de la red y sus restricciones, es decir, la descripción del problema. Cabe mencionar que se ha buscado mantener la linealidad de los modelos, lo que nos permitiría la solución del mismo por las técnicas ya conocidas para problemas del tipo *CVRP*.

3.2 ESTRUCTURACIÓN MATEMÁTICA

En este capítulo se formulan algunos de los problemas clásicos y sus extensiones como parte de la programación lineal. La red de transporte por la que circulan los vehículos se modela con un grafo ponderado $G=(V,E,C)$. Los nodos del grafo representan a los clientes y al depósito. En problemas con un depósito y n clientes, el nodo 0 representa al depósito y los nodos $1, \dots, n$, a los clientes. En algunos casos (en que se especificará), se agrega una copia del depósito etiquetada con $n+1$ para simplificar la formulación.

Cada arco (i,j) , representa el camino para ir desde el nodo i hacia el nodo j en la red de transporte y tiene asociado un costo c_{ij} y un tiempo de viaje t_{ij} . Según la estructura de los tiempos, costos y las características de la red, el grafo puede ser simétrico o asimétrico. Puede suponerse que G es completo, pues entre todo par de lugares de una red de transporte razonable, debería existir algún camino.

3.3 EL PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO (*TSP*)

En el *TSP* se dispone de un solo vehículo que debe visitar a todos los clientes en una sola ruta y a un costo mínimo. No suele haber un depósito (y si lo hubiera, no se distingue de los clientes), no hay demanda asociada a los clientes y tampoco hay restricciones temporales. El problema puede formularse como:

$$\text{Min } Z = \sum_{i,j \in E} c_{ij} \cdot x_{ij}^k \quad (3.1)$$

s.a.

$$\sum_{j \in J^+(i)} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in J^-(j)} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in S, j \in J^+(i)/S} x_{ij} \geq 1 \quad \forall S \subset V \quad (3.4)$$

$$x_{ij} \in \{1, 0\} \quad \forall i, \forall j, \in E \quad (3.5)$$

Esta formulación fue propuesta por Dantzig, Fulkerson y Johnson [9]. Las variables binarias x_{ij} indican si el arco (i, j) es utilizado en la solución. La función objetivo (3.1) establece que el costo total de la solución es la suma de los costos de los arcos utilizados. Las restricciones (3.2 y 3.3) indican que la ruta debe llegar y abandonar cada nodo exactamente una vez. Finalmente, las restricciones (3.4) son llamadas restricciones de eliminación de subciclos e indican que todo subconjunto de nodos S debe ser abandonado al menos una vez. Notar que si no se impusieran estas restricciones la solución podría constar de más de un ciclo, como se muestra en la figura 3.1. Esta solución viola la restricción (3.4) para $S = 0, 1, 2$. Existen diferentes tipos de restricciones de eliminación de subciclos. [19]

Asumiendo que el conjunto $|E| = O(n^2)$, esta formulación tiene una cantidad $O(n^2)$ de variables binarias y $O(2^n)$ restricciones. El problema puede formularse con una cantidad polinomial de restricciones, agregando variables reales u_i para $i = 1, \dots, n$ y sustituyendo

las restricciones 3.4 por:

$$u_i - u_j + nx_{ij}^k \leq |I| - 1; \quad \forall i \in I \setminus \{0\}, \quad \forall j \in E \setminus \{0\}, \quad \forall k \quad (3.6)$$

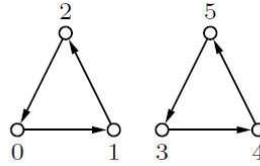


Figura 3.1: Una solución formada por 2 subciclos

Estas desigualdades fueron propuestas por Miller, Tucker y Zemlin [23] y fuerzan a que las variables reales u determinen una cantidad estrictamente creciente a lo largo de la ruta (es decir, $u_i = u_{i+1}$ si j es visitado inmediatamente después que i). Bajo la hipótesis de que $|E| = O(n^2)$, en esta nueva formulación hay $O(n^2)$ variables binarias, $O(n)$ variables positivas y $O(n^2)$ restricciones. Sin embargo, esta formulación no resulta apta para la resolución de problemas de tamaño considerable mediante métodos exactos, pues si bien se disminuye la cantidad de restricciones, la cota que se obtiene resolviendo su relajación lineal resulta en general poco ajustada. La mayor parte de los problemas de ruteo de vehículos son generalizaciones del *TSP*. En ese sentido, éste puede considerarse el problema de ruteo de vehículos más simple. No obstante, pertenece a la clase de problemas *NP-Hard* [28] y es uno de los problemas de optimización combinatoria más clásico y difundido.

3.4 RUTEO DE VEHÍCULOS CAPACITADO (*CVRP*)

El *VRP* es una extensión del *m-TSP* en la cual cada cliente $i \in V \setminus 0$ tiene asociada una demanda d_{ij} ¹ y cada vehículo tiene una capacidad C (la flota es homogénea). [21] En este problema la cantidad de rutas no es fijada de antemano como en el *TSP* y en el *m-TSP*. Para un conjunto de clientes S , $d(S) = \sum_{S \in d_i}$, es su demanda total y $r(S)$ indica

¹En algunos casos, por preservar la notación original, se utilizará d_{ij} para indicar la distancia entre los nodos i y j y algún otro símbolo para la demanda de los clientes

la mínima cantidad de vehículos necesarios servirlos a todos. En la formulación conocida con el nombre de flujo de vehículos de dos índices, se utilizan las variables binarias x_{ij} para determinar si el arco (i, j) se utiliza o no en la solución. El problema se formula de la siguiente manera:

$$\text{Min } Z = \sum_{ij \in E} x_{ij} \cdot C_{ij} \quad (3.7)$$

$$\text{s.a. } \sum_{j \in J+(0)} x_{0j} = m \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in I-(0)} x_{i0} = m \quad (3.9)$$

$$\sum_{j \in J+(i)} x_{ij} = 1 \quad \forall I \in V \setminus \{0\} \quad (3.10)$$

$$\sum_{i \in I-(j)} x_{ij} = 1 \quad \forall I \in V \setminus \{0\} \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in S, j \in J+(i)/S} x_{ij} \geq r(S) \quad \forall S \subset V \setminus \{0\} \quad (3.12)$$

$$m \geq 1, x_{ij} \in \{1, 0\} \quad \forall i, \forall j \quad (3.13)$$

La función objetivo (3.7) es el costo total de la solución. Las restricciones (3.8) y (3.9) indican que m es la cantidad de vehículos utilizados en la solución y que únicamente los vehículos necesarios parten del depósito y regresan al mismo punto. Las restricciones (3.10 y 3.11) aseguran que todo cliente es un nodo intermedio de alguna ruta. La restricción (3.12) actúa como restricción de eliminación de subciclos y a la vez impone que la demanda total de los clientes visitados por un vehículo no puede superar la capacidad C y finalmente, la ecuación (3.13) denota m como la cantidad de autobuses y que el problema tiene una variable entera binaria.

3.5 RUTEO CON VENTANAS DE TIEMPO (*VRPTW*)

El problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (*VRPTW*) es una extensión del *CVRP* en el que se considera lo siguiente; los vehículos tienen una capacidad

limitada y cada cliente i tiene incorporado un intervalo de tiempo $[a_i; b_i]$ al que llamaremos ventana de tiempo. Tiempo de viaje dado para cada punto $(i;j)$ mas un tiempo de servicio para cada cliente S_i . El tiempo en que un cliente comienza a ser atendido está asociado a su ventana de tiempo y podrá estar en espera en la ubicación del cliente en un tiempo igual a S_i , en caso de que el vehículo llegue antes del tiempo a_i se le esta permitido esperar hasta que inicie el servicio [5]. En la figura 3.2 se muestra el ejemplo clásico del *VRP* con ventanas de tiempo, también llamadas ventanas de servicio.

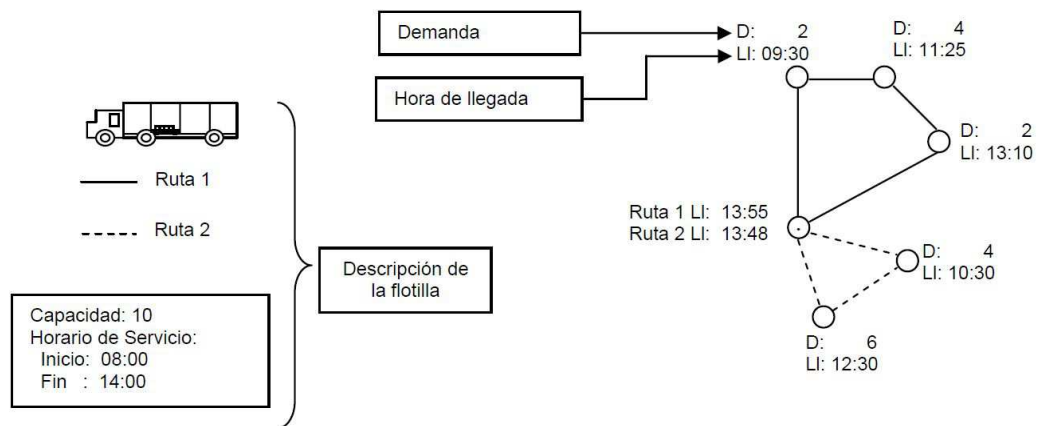


Figura 3.2: Representación clásica del VRP con ventanas de tiempo.

El *VRPTW* consiste en encontrar una colección exacta de P circuitos simples un mínimo costo que cumpla con lo siguiente:

- Cada circuito visita el depósito.
- Cada cliente se encuentra en un solo circuito.
- La suma de las demandas de los clientes localizados en un circuito no puede sobrepasar la capacidad del vehículo.
- Para cada cliente i el servicio inicia con la ventana de tiempo $[a_i; b_i]$ y el vehículo se detiene S_i instantes de tiempo.

3.6 RUTEO DE VEHÍCULOS CAPACITADO; MÍN-MÁX *VRP*

El Problema de Vehículos con Multi Depósito (*MDVRP*, por sus siglas en inglés) es una generalización del Problema de Vehículos con un Depósito (*SDVRP*, por sus siglas en inglés) en el que el vehículo(s) se inicia a partir de múltiples depósitos y regreso a sus depósitos de origen al final de sus giras asignadas [3]. El objetivo tradicional es minimizar el tiempo máximo de sus recorridos y la literatura existente se ocupa de este problema con una variedad de supuestos y limitaciones.

En este trabajo, se explora la idea de minimizar el tiempo máximo de un recorrido en un *SDVRP* («mín-máx *VRP*»), utilizando tanto el análisis teórico y de diseño. En lo que respecta a nuestro conocimiento, ninguna exploración previa de mín-máx *VRP* se ha publicado, pero esta formulación es ventajosa para una serie de aplicaciones. Por ejemplo, considere un modelo de red en la que los depósitos representan los servidores y los usuarios representan a los clientes. Una topología de enrutamiento de red generado por la solución de los resultados mín-máx *VRP* en un conjunto de la red de conexión en cadena que reduzcan al mínimo el servicio máximo entre un servidor y el usuario. Esto puede ser ventajoso en situaciones en las que el costo de la conexión usuario-servidor es alta, pero el costo de conexión de cliente-cliente es baja.

La formulación del mín-máx *VRP* es la siguiente, con la suposición de que todos los puntos son al azar y uniformemente distribuidos en un plano euclidiano²:

$$\text{Min } \lambda \tag{3.14}$$

$$\text{s.a : } TSP(S_i) \leq \lambda; \forall i \tag{3.15}$$

²Año 300 A.C: Éuclides de Alejandría recopila reglas de uso común para medir y construir casas; básicamente, es el conjunto de puntos que se extienden indefinidamente, a semejanza de un pizarrón, papel o piso, que viene acompañado de nociones de rectas y distancia.

$$\cup S_i = N \quad (3.16)$$

dónde N es el conjunto de todos los clientes, $S_i \subset N$ es el subconjunto de clientes asignado al vehículo i , y $TSP(S)$ es el TSP mínimo recorrido de longitud para visitar todos los clientes en el conjunto S .

Además, las sumas de las longitudes de viaje que este método genera son muy comparables a la minimización de las longitudes totales producidos por los métodos tradicionales, además que el método min-max VRP también es capaz de procesar decenas de miles de clientes rápidamente, adecuando una característica de proporcionalidad que es cada vez más importante como las redes que se expanden en tamaño.

Para este trabajo, señalaremos un análisis teórico de la solución óptima del min-max $MDVRP$ mediante el desarrollo de límites inferior y superior. Entonces, mostraremos que la solución óptima para VRP esta linealmente cerca del óptimo recorrido por todos los clientes, dividido por el número de nodos limitados por un depósito.

3.7 TRABAJOS RELACIONADOS CON VRP

El VRP ha sido abordado por gran cantidad de investigadores con diversas metaheurísticas y algoritmos exactos. En la tabla 3.1, se muestran algunos de los trabajos más importantes, desarrollados por distintas variantes.

Dentro de la investigación de operaciones y a lo largo del tiempo, se han ido investigando diversos factores según los diferentes objetivos propuestos, tales como: minimizar el número de autobuses (B); minimizar las distancias recorridas por las rutas (LR) y Equidad (E) en el balance de carga. En el artículo de Spada (2005) [27], se considera un criterio único denominado *child's time lost*, que puede ser clasificado dentro de los criterios de efectividad, definido como la medida de la diferencia de tiempos entre el viaje que hace el pasajero en el autobús y el tiempo que espera en la parada, es decir, es el tiempo efectivo del transporte total desde la casa al depósito final. Los objetivos considerados en

los trabajos son:

- Número de autobuses utilizados (B)
- Largo de la ruta (LR)
- Tiempo del pasajero en el autobús (E)
- Balance de carga (BC)
- Largo máximo de las rutas (LMR)
- *Child's time lost* (TL)

<i>Variante</i>	<i>Autor</i>	<i>Perspectiva algorítmica</i>	<i>Enfoque de solución</i>
CVRP	[12]	Ramificación y Poda	Exacto
		Sistema de colonia de hormigas	Metaheurístico
		Búsqueda adaptativa por entornos grandes	Metaheurístico
VRPTW	[12]	Búsqueda por entornos grandes	Metaheurístico
		Múltiple sistema de colonia de hormigas	Metaheurístico
	[24]	Algoritmo genético	Metaheurístico
		Búsqueda adaptativa por entornos grandes	Metaheurístico
MDVRP	[26]	Búsqueda local	Metaheurístico
		Búsqueda adaptativa por entornos grandes	Metaheurístico
SDVRP	[1]	Ramificación y costo	Exacto
VRPPD	[25]	Algoritmos de particionamiento de recorridos	Heurístico
VRPB	[16]	Heurística de asignación generalizada	Heurístico
SVRP	[14]	Metodo entero "Forma L"	Exacto

Tabla 3.1: Análisis del problema frente a variantes del VRP.

Fuente: propia.

3.8 MÉTODOS DE SOLUCIÓN PROPUESTOS

Una de las ramificaciones del *VRP* es el problema *CVRP* que además, es base para la aplicación del método min-max *MDVRP* descrito en la sección anterior y que en ambos se diseñan nodos estratégicos con límites de capacidad, balanceo y tiempo.

Para ésta tesis, se han propuesto varios métodos para solucionar el *VRP* y se pueden agrupar en exactos y aproximados.

3.8.1 ALGORITMOS EXACTOS

Como se mencionó en el capítulo 2, este trabajo será enfocado a resolverse de manera exacta, debido a que se tendrá el conocimiento preciso de la demanda.

La principal desventaja de estos métodos es que pueden necesitar de tiempo excesivo para algunos casos de problemas. Una ventaja de los métodos exactos para problemas de optimización combinatoria es que son capaces de mostrar que los casos no pueden tener soluciones. Ejemplo de estos métodos son: ramificación y acotamiento, ramificación y corte, partición de conjuntos y generación de columnas.

3.8.2 ALGORITMOS APROXIMADOS

Los métodos aproximados se utilizan para encontrar soluciones aproximadas a problemas de optimización.

Ellos encuentran soluciones que no son necesariamente los mejores, pero están cerca de la solución óptima.

Los algoritmos aproximados varían de una solución exacta ya que no pueden demostrar que existen soluciones en el caso de problemas de satisfacción. Los algoritmos

de aproximación son cada vez más y se utilizan para los problemas que se conocen como algoritmos exactos en tiempo polinomial, pero que son demasiado robustos debido al tamaño de entrada. Un algoritmo aproximado resuelve un problema de optimización si siempre da una solución factible cerca de la óptima dentro de un factor α , llamado relación de aproximación.

Los métodos aproximados se clasifican a su vez en heurísticas y metaheurísticas.

Heurísticas: En general, la heurística es encontrar soluciones entre todas las soluciones factibles, pero no garantizan que la solución sea la óptima. Nosotros habitualmente optamos por usar la heurística cuando el problema en cuestión es conocido por ser *NP-hard* [29]. Los problemas *NP-Hard* producen rápidamente soluciones que son lo suficientemente buenas para la resolución de problemas en cuestión, pero las soluciones pueden no ser la mejor de todas.

Metaheurísticas: Una metaheurística es un conjunto de conceptos que se pueden utilizar para definir los métodos heurísticos que se pueden aplicar a una amplia serie de problemas diferentes. En otras palabras, una metaheurística puede ser vista como un marco algorítmico general que se puede aplicar a diferentes problemas de optimización con relativamente pocas modificaciones para que sean adaptados a un problema específico. Algunos ejemplos de metaheurísticas incluyen recocido simulado (*SA*), búsqueda tabú (*TS*), búsqueda local (*ILS*), los algoritmos evolutivos (*CE*), y la optimización de colonias de hormigas (*ACO*) [22].

Para este proyecto, nos basaremos en algoritmos exactos, dado que se tendrán las rutas previamente definidas y el número de usuarios no sobrepasará el total de la demanda de la empresa, además de tener definida la capacidad de cada vehículo y la ruta prediseñada.

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En esta tesis abordamos un problema que contribuye a la construcción de un sistema eficiente en el traslado de personal que debe viajar diariamente entre su ciudad establecida (Cd Juárez/Monterrey/San Nicolás/Apodaca/Guadalupe) como residencia y un determinado parque industrial, donde se encuentra la empresa dedicada a la industria huletera (fabricación de llantas), ubicada a varios kilómetros de distancia de la ciudad (Ciénega de Flores, límites con Escobedo, NL).

La empresa, trabaja en régimen continuo y el personal opera en diferentes sistemas de turno según el área o unidad donde desarrolla sus labores. Los dos turnos de trabajo existentes dan lugar a diferentes horarios de traslado de personal, dividiendo a su vez los autobuses según el traslado de personal administrativo y operativo.

Todos los autobuses realizan un recorrido de más de una hora de viaje en la mañana, desde la ciudad al parque industrial y un recorrido en la tarde, desde el parque industrial a la ciudad. Adicionalmente, los autobuses del personal operativo realizan un recorrido extra en la mañana (un sólo autobús), adicional en una misma ruta o camino.

Para dichos traslados existe una empresa externa (LOGO Transportes) que cuenta con una flota de autobuses con la misma capacidad, correspondiéndole a la propia empresa la definición de las rutas y paradas en los diferentes traslados requeridos, principal objetivo del presente estudio.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

El problema de optimización de las rutas de transporte se origina debido a la prioridad del usuario final, en este caso las inconformidades del personal de operación, la cual tiene una utilización del 84 % de los autobuses. La situación actual comprende desde un diseño obsoleto de rutas de transporte hasta desbalances y compensaciones de capacidad en diferentes trayectos.

<i>Ruta</i>	<i>Cap. máx.</i>	<i>Usuarios prom.</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>Comentarios</i>
San Roque	40	33	84 %	Ruta crítica, sobrecapacidad.
Casa Blanca	40	17	44 %	Ruta crítica, pocos usuarios.
Colón	40	27	71 %	
Lincoln	40	22	57 %	Fuente: Investigación propia.

Tabla 4.1: Relación de usuarios y la capacidad del vehículo.

El sistema de transporte en estudio presentaba de hecho algunas dificultades que motivaron el presente trabajo, las cuales se describen a continuación: la no existencia de paraderos definidos en el recorrido de los autobuses (que genera muchas detenciones/ruteos no óptimos), una baja utilización de algunos autobuses contratados y la redundancia en la cobertura de algunos recorridos, todo lo cual implica una utilización ineficiente de los recursos que se esperaba explorar y mejorar con el empleo de alternativas metodológicas de la investigación de operaciones como las descritas en este trabajo.

Actualmente existen 4 recorridos¹ ó caminos (Colón, San Roque, Casa blanca, Lincoln) los cuales deben cubrir los horarios 7:00 am y 7:00 pm.

A continuación, las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 muestran las rutas de los autobuses que trasladan el personal administrativo (previo al estudio y ajuste).

¹Cabe destacar, que un quinto vehículo es utilizado en cuestión, para acaparar la demanda del camino de San Roque, puesto que un solo vehículo no cumple con la capacidad para dicho camino

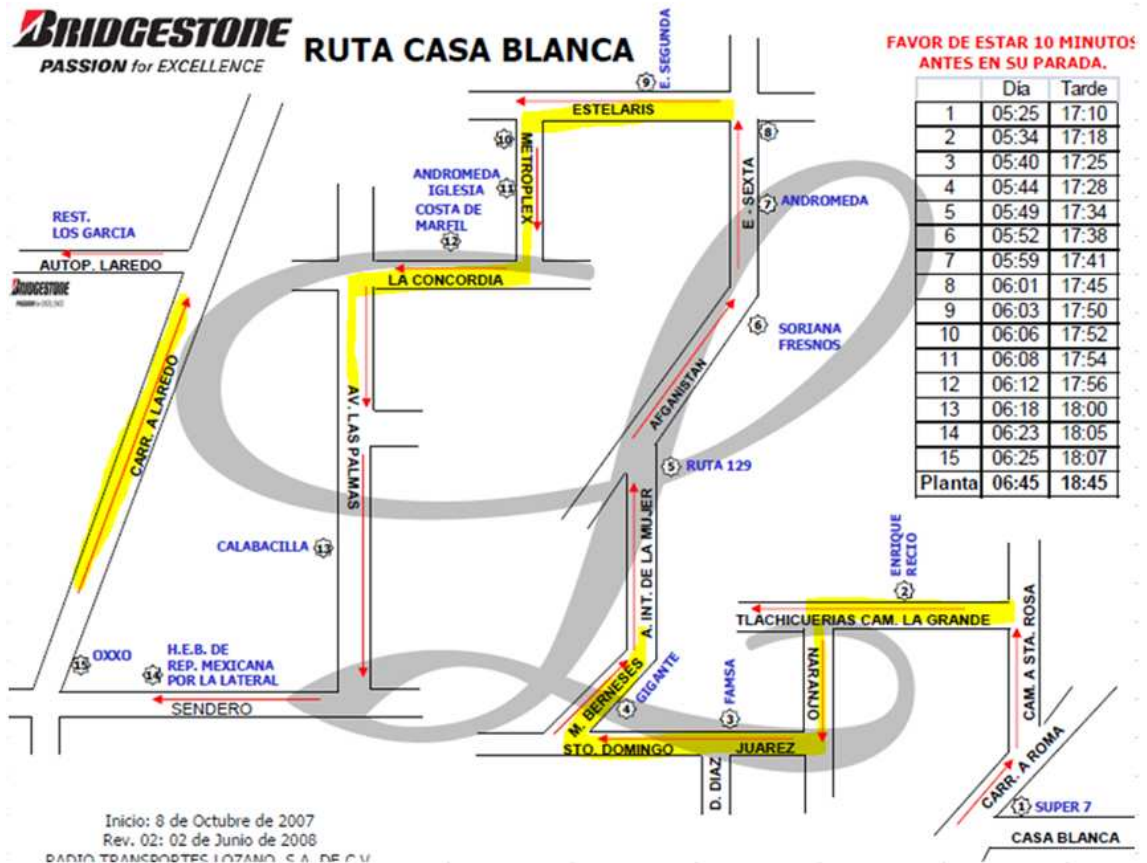


Figura 4.1: Recorrido actual de la ruta Casa Blanca.

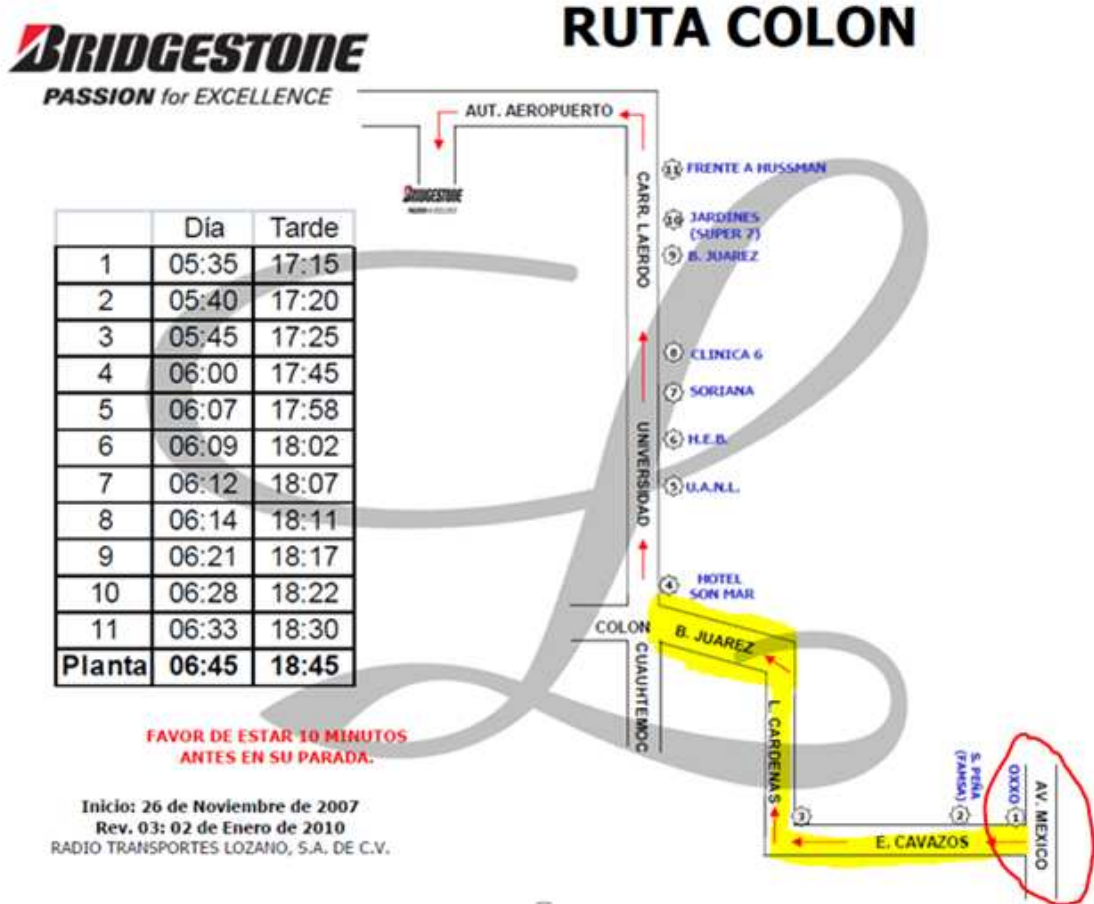


Figura 4.2: Recorrido actual de la ruta Colón.

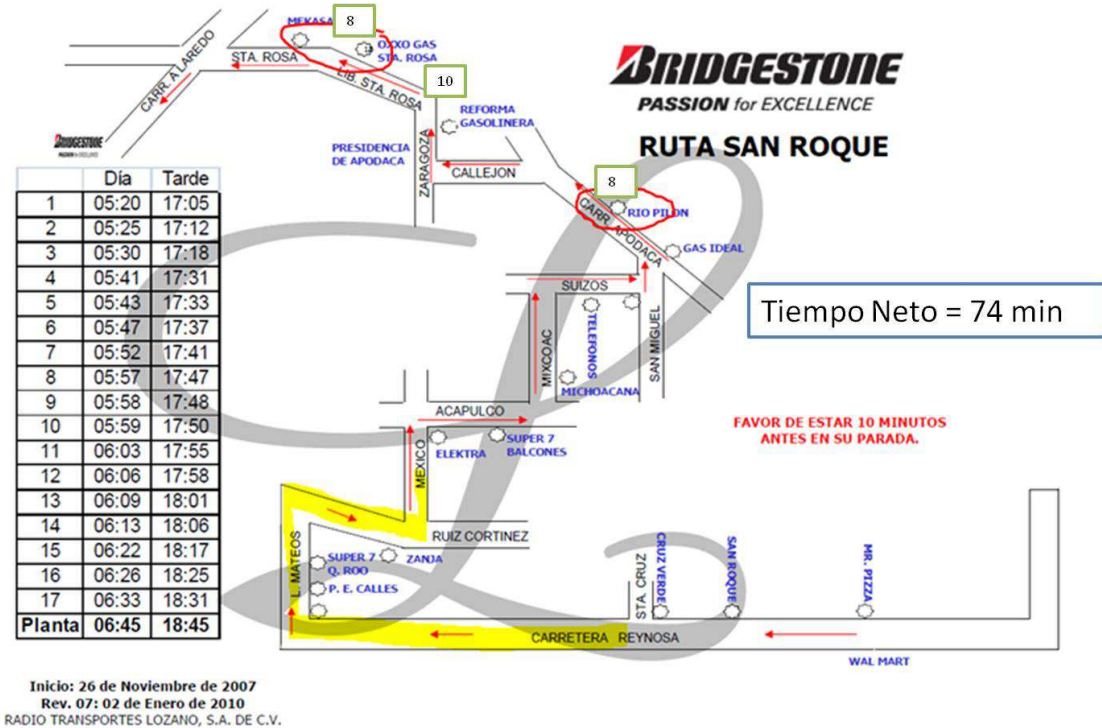
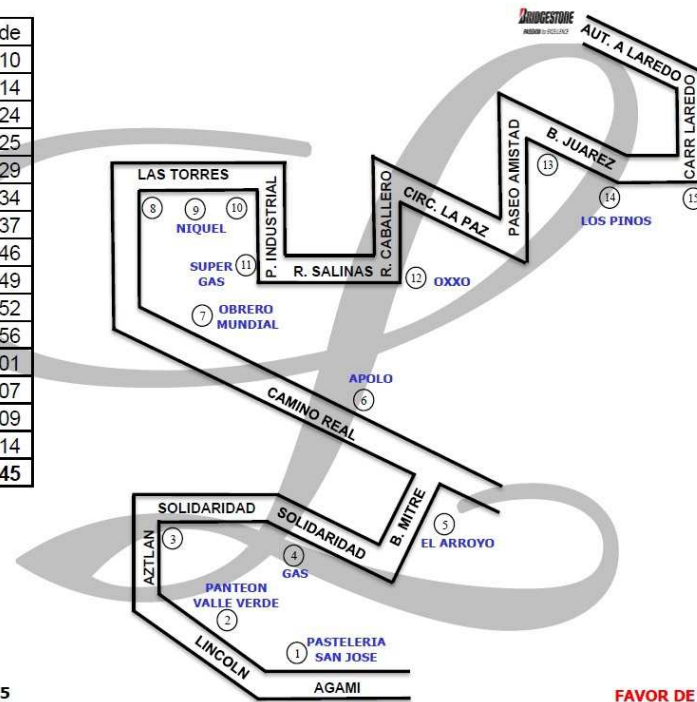


Figura 4.3: Recorrido actual de la ruta San Roque.

BRIDGESTONE **RUTA LINCOLN**
PASSION for EXCELLENCE

	Día	Tarde
1	05:20	17:10
2	05:25	17:14
3	05:34	17:24
4	05:35	17:25
5	05:39	17:29
6	05:45	17:34
7	05:47	17:37
8	05:56	17:46
9	05:59	17:49
10	06:03	17:52
11	06:06	17:56
12	06:11	18:01
13	06:17	18:07
14	06:19	18:09
15	06:24	18:14
Planta	06:45	18:45



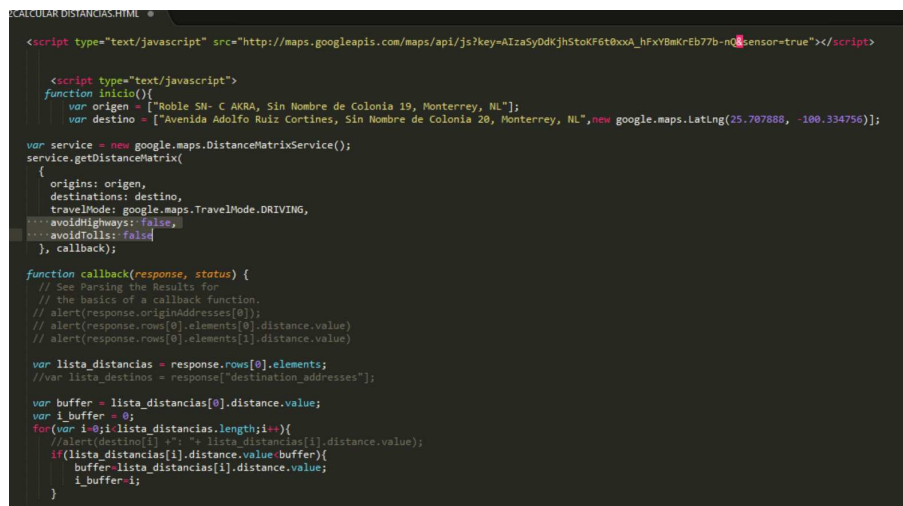
Revisión 06: 13 de ENERO de 2015
 RADIO TRANSPORTES LOZANO, S.A. DE C.V.

**FAVOR DE ESTAR 10 MINUTOS
 ANTES EN SU PARADA.**

Figura 4.4: Recorrido actual de la ruta Lincoln.

4.2 ESTUDIO DE LOCALIZACIÓN DE NODOS

Para este análisis, se realizó una base de datos de las direcciones de cada usuario, que a pesar de que varias de ellas coinciden con la misma «manzana-barrio», se lograron ubicar directamente con ayuda de las coordenadas (longitud y latitud), mediante la herramienta *Sublime text*, dónde se construyó una interfaz a través de la programación *HTML* para conectar con eficiencia los mapas en conjunto con la dirección .



```

CALCULAR DISTANCIAS.HTML
<script type="text/javascript" src="http://maps.googleapis.com/maps/api/js?key=AIzaSyDdkJhStoK6t0xxA_hFvYBmKrEb77b-nc&sensor=true"></script>

<script type="text/javascript">
function inicio(){
  var origen = ["Roble SN- C AKRA, Sin Nombre de Colonia 19, Monterrey, NL"];
  var destino = ["Avenida Adolfo Ruiz Cortines, Sin Nombre de Colonia 20, Monterrey, NL", new google.maps.LatLng(25.707888, -100.334756)];

  var service = new google.maps.DistanceMatrixService();
  service.getDistanceMatrix(
    {
      origins: origen,
      destinations: destino,
      travelMode: google.maps.TravelMode.DRIVING,
      avoidHighways: false,
      avoidTolls: false
    }, callback);

  function callback(response, status) {
    // See Parsing the Results for
    // the basics of a callback function.
    // alert(response.originAddresses[0]);
    // alert(response.rows[0].elements[0].distance.value)
    // alert(response.rows[0].elements[1].distance.value)

    var lista_distancias = response.rows[0].elements;
    //var lista_destinos = response["destination_addresses"];

    var i_buffer = lista_distancias[0].distance.value;
    var i_buffer = 0;
    for (var i=0;i<lista_distancias.length;i++){
      //alert(destino[i] + " " + lista_distancias[i].distance.value);
      if (lista_distancias[i].distance.value < i_buffer){
        i_buffer = lista_distancias[i].distance.value;
        i_buffer = i;
      }
    }
  }
}

```

Figura 4.5: Interfaz de la programación HTML para la obtención de coordenadas.

Fuente: Sublime text editor 2.1

4.2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS CLIENTES

El diseño de un sistema de transporte en autobuses para el personal representa una actividad importante dentro de la logística del proceso productivo de una empresa transnacional e importante en la fabricación de llantas. Decidir adecuadamente donde se localizarán los diferentes paraderos y que ruta seguirá cada autobús contribuirá a mejorar las ventajas competitivas para la organización e incluso reducir externalidades como la congestión de rutas y la disconformidad de los mismos usuarios ante un mal servicio. Con la ayuda de la programación *HTML* para la obtención de coordenadas, fue necesario rea-

lizar el ejercicio en el mapa de la zona metropolitana, con el fin de revisar y analizar los nodos potenciales de demanda y, con ayuda del modelo matemático, efectuar las paradas óptimas que acaparen demanda en su totalidad.

En la figura 4.6 se muestra la dispersión de todos los usuarios de los autobuses dentro del mapa del área metropolitana de Monterrey.

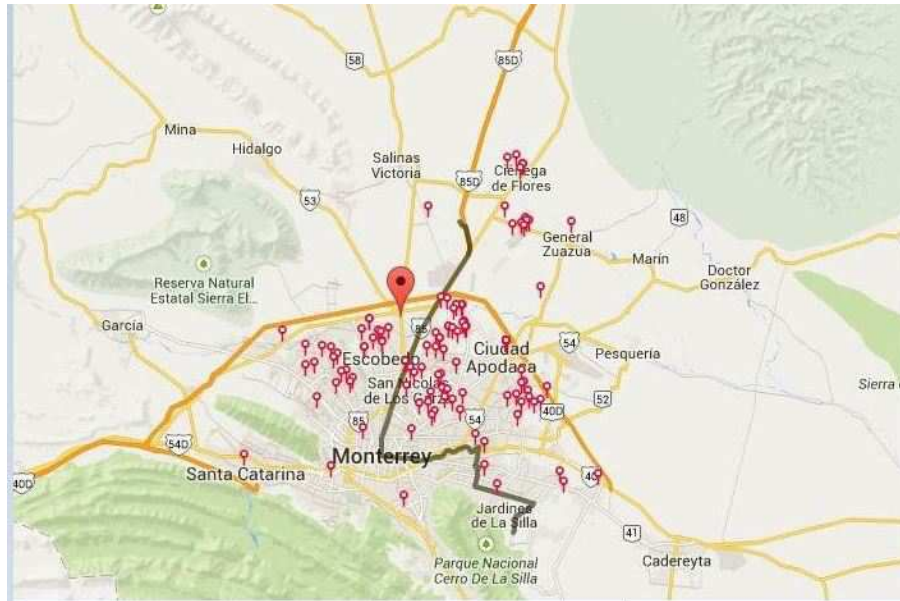


Figura 4.6: Topología del número de usuarios en Nuevo León.

En este bloque, se logró comprender la georeferenciación en base a la programación en *HTML*, con el fin de ubicar a todos los usuarios con la dirección exacta de sus domicilios (coordenadas), para ayudar a localizar los paraderos con demanda potencial, esto con ayuda de la ejecución en *GAMS* de la modelación, que veremos en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 5

FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

En éste capítulo conoceremos la formulación matemática completa del problema, desde la función objetivo hasta sus restricciones, mencionando los supuestos y características que serán tomadas en cuenta, dadas las necesidades de nuestro proyecto.

5.1 INTRODUCCIÓN

El *VRP* esta formado por redes de distribución en las cuales encontramos las plantas de producción y centros de distribución. Dentro de este ambiente, podemos aplicar este tipo de problemas en la recolección del personal, que parten de su domicilio hasta el lugar de trabajo, que en conjunto, formarán paraderos potenciales, en dónde interactuarán arcos y caminos que construirán una red, siempre tomando en cuenta las características del problema como capacidad, llegadas, tiempos, etc.

Esta selección y asignación cuidadosa da como resultado un proceso de toma de decisiones apoyado por la investigación de operaciones. Por medio de este proceso se busca minimizar los costos totales de distribución en los que encontramos: el costo fijo es debido a la adquisición ya sea por compra o renta del equipo/autobús esto independientemente

si se usa o no, el costo variable que representa, el costo de combustible, distancia entre los nodos y la planta, siempre que este equipo sea utilizado. Esta red de distribución esta sujeta a la capacidad de personas que pueden ingresar como máximo a cada uno de los autobuses, así los tiempos de recorrido que realizarán cada una de las rutas posibles asignadas.

5.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROBLEMA

Dada las características de nuestro problema se pueden presentar diferentes alternativas para minimizar los costos de distribución.

Al manejar diferentes trayectos, se podrá verificar qué ruta necesita mayor capacidad ó qué ruta necesita balanceo.

Al contar con un número mayor de capacidad de transporte en comparación con la demanda, podremos asumir que el uso de la cantidad de transportes será topado acorde a la cantidad de usuarios que lo utilicen. Además, una de las alternativas a revisar, es el tiempo de servicio, que a pesar de ser una variable significativa, juega un papel importante dada la maximización de la capacidad pueda elevar este tiempo. En cuanto las ventanas de tiempo, dada la naturaleza de nuestro problema, no intervienen directamente en la minimización de costos, ya que cada ruta es rentada diariamente y no aplica ningún costo variable adicional o por multa.

Al hacer el estudio de capacidad por cada una de nuestras zonas, nos dimos cuenta que una de las partes importantes a considerar en el modelo es el balanceo de la misma, siempre y cuando cumpla las condiciones de acaparar el 100 % de la demanda y no exceder el tiempo de servicio, con estas dos condiciones, crearemos límites en donde nuestro problema balanceará de la manera mas conveniente a la demanda.

El objetivo es encontrar un equilibrio entre estas alternativas y que nos dé la posibilidad de formar esta situación como un problema de optimización que se pueda resolver

mediante las técnicas de optimización adecuadas.

5.3 SUPOSICIONES DEL MODELO

A continuación señalaremos las suposiciones que deberá cubrir la modelación, así como las restricciones que llevará nuestro modelo.

1. Se satisface la demanda de todos los clientes.
2. Cada nodo que tiene demanda debe ser visitado una sola vez por algún vehículo.
3. Cada arco (i,j) tiene asociado un costo c_{ij} y una duración del viaje t_{ij} .
4. Cada vehículo hace un solo viaje (ida y vuelta).
5. Se conoce la demanda de cada nodo y debe ser atendida por un solo vehículo.
6. El único costo relevante es el costo de transporte diario.
7. Se conoce el tiempo de servicio de cada una de las rutas. Éste no debe exceder en cada viaje.
8. No existen penalizaciones por fuera de horario. Quedará a disposición de las autoridades correspondientes.
9. Se tiene una cantidad k de vehículos de capacidad homogénea y limitada.
10. Cada vehículo es asignado a una sola ruta que debe cubrir.
11. La suma de las capacidades es menor a la demanda.
12. El problema es determinístico.

5.4 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

5.4.1 NOTACIÓN DEL PROBLEMA

Enseguida presentaremos la notación del problema:

- K : Conjunto de vehículos disponibles $(1,2,\dots,m)$.
- I : Conjunto de nodos disponibles $(1,2,\dots,n)$.
- J : alias de I (nodo destino).

5.4.2 PARÁMETROS

En esta sección enlistaremos los parámetros de nuestro problema:

- W_k : Capacidad del Vehículo.
- D_i : Demanda de cada cliente i .
- c_{ij} : Distancia del nodo i al nodo j .
- t_{ij} : Tiempo de duración del servicio.

5.4.3 VARIABLES DE DECISIÓN

Las variables de decisión están representadas en esta sección:

u_i : Variable asociada al nodo i para evitar que se formen subrutas en la solución.

b_{ik} : Se define para cada nodo i y para cada vehículo k e indica el momento en el que empieza el servicio.

λ_k : Representa el tiempo mayor del servicio.

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{:Si el arco } (i, j) \text{ pertenece a la ruta del vehiculo } k \\ 0 & \text{:De lo contrario} \end{cases}$$

5.5 FUNCIÓN OBJETIVO

$$\text{Min } \lambda \tag{5.1}$$

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{ij} \cdot x_{ij}^k \tag{5.2}$$

5.6 RESTRICCIONES

$$TSP(S_i) \leq \lambda; \quad \forall i \tag{5.3}$$

$$\cup S_i = N \tag{5.4}$$

$$\sum_k \sum_{i \in I} x_{ij}^k = 1 \quad \sum_k \sum_{i \in I} x_{ji}^k = 1 \quad \forall j \in J \setminus \{0\} \tag{5.5}$$

$$\sum_k \sum_{j \in J} x_{0j}^k = K \tag{5.6}$$

$$\sum_k \sum_{j \in J} x_{jn+1}^k = Ku_i - u_j + nx_{ij}^k \leq |I| - 1; \quad \forall i \in I \setminus \{0\}, \quad \forall j \in J \setminus \{0\}, \quad \forall k \quad (5.7)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij}^k \cdot D_i \leq W_k; \quad \forall k \quad (5.8)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij}^k = \sum_{i \in I} x_{ji}^k; \quad \forall k, \quad \forall j \in J \setminus \{0\} \quad x_{ij}^k (b_{ik} + t_{ij} - b_{jk}) \leq 0; \quad \forall i, j \in I, \quad \forall k \in K \quad (5.9)$$

$$x_{ij}^k \in \{1, 0\} \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (5.10)$$

$$(5.11)$$

La formulación 5.1 supone de que todos los puntos son al azar y son distribuidos de manera uniforme en un plano.

La función objetivo 5.2 indica la minimización del tiempo entre un nodo i a un nodo j , hasta el depósito.

Las restricciones 5.3 y 5.4 explican que N es el conjunto de todos los clientes, $S_i \cup N$ es el subconjunto de clientes asignado al vehículo i , y $TSP(S)$ es el TSP mínimo recorrido de longitud para visitar todos los clientes en el conjunto S .

Las expresiones 5.5 cumplen que a cada nodo referente a un cliente se llega y sale una vez, garantizando la visita en una sola ocasión.

Las expresiones 5.6 garantizan que del nodo depósito salen el número de vehículos disponibles.

La restricción 5.7 garantiza que la ruta que hace cada vehículo no tenga subrutas es decir garantiza que todas las rutas incluyan al nodo 0, que es el depósito. La expresión 5.8 garantiza que no se excede la capacidad de cada vehículo. La expresión 5.9 garantiza que el vehículo que llegue a cada cliente es igual al vehículo que sale de ese cliente. Así mismo en la expresión 5.9 se establece que el vehículo k no pueda llegar a j antes de $|b_{ij}| + t_{ij}$, cuando se viaja de i a j . Por último, la expresión 5.10 representa las restricciones naturales, donde se indica que la variable es entera binaria.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

Se logró formular exitosamente el modelo matemático para nuestro problema de Ruteo de Vehículos con el cual fue planteado en programación entera y que da solución a los recursos de transporte. Tomado en cuenta que la principal diferencia de este modelo contra las formulaciones clásicas, esta en que se minimiza el tiempo máximo de traslado y que maneja un depósito final: El lugar de trabajo.

6.2 CONTRIBUCIONES

Los experimentos realizados en diferentes pruebas, nos llevaron a la solución óptima, logrando generar los nodos potenciales que fungirán como las paradas para cada ruta disponible. Este proyecto ha logrado eliminar por completo **un vehículo** logrando impactos en el costo directo de la empresa, en alrededorde \$3,000 dólares mensuales. Además de las aportaciones económicas y del beneficio que se le otorga al usuario, respecto a comodidad y puntualidad, éste estudio ha generado la confianza para brincar a la siguiente generación, dado que los nodos,rutas,tiempos y distancias, podrán ser revisados de manera rápida y segura en un dispositivo móvil. Esta gran aportación moderniza de manera

general al medio de transporte terrestre, específicamente el transporte de personal, ya que hoy en día las consultas en equipos modernos crecen de manera importante.

La siguiente figura (6.1) representa a la aplicación que determina la ruta próxima y la parada que debe tomarse acorde a la ubicación del usuario y que éste a su vez llevará en su dispositivo móvil.

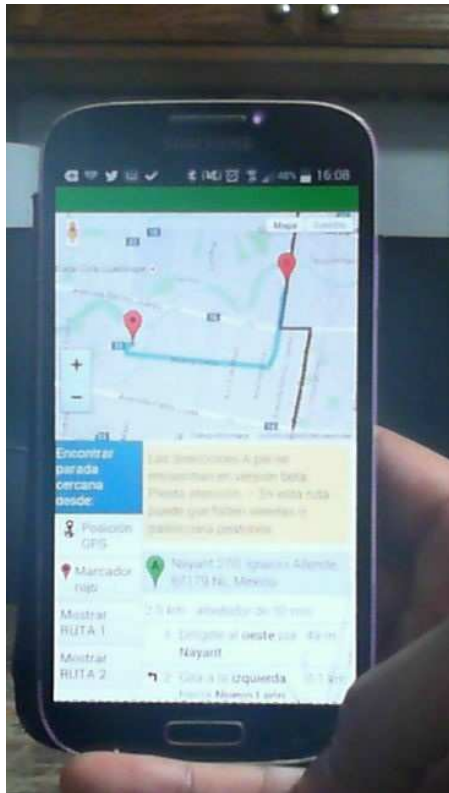


Figura 6.1: Aplicación en dispositivo móvil.

6.3 TRABAJO FUTURO

Una de las aportaciones futuras que pudieramos agregar a este trabajo, es el de incrementar la flexibilidad para introducir datos, ya que el modelo en sí puede trabajarse para cualquier empresa que maneje transporte de personal. Con ésta incorporación, estamos garantizando ahorros directamente a cualquier empresa sin tomar tiempo en adaptar ciertas restricciones que definan la naturaleza del problema.

APÉNDICE A

GAMS

A.1 GENERALIDADES DE *GAMS*

Alrededor de la década de los cincuenta ha ocurrido un determinante desarrollo de algoritmos y códigos computacionales para la solución y análisis de problemas de programación matemática. A principios de los ochenta, los sistemas de modelado tuvieron gran parte de su desarrollo. Uno de los sistemas de modelado que se desarrollaron principalmente fué el General Algebraic Modeling System (*GAMS*), el cual es un sistema de alto nivel utilizado para la modelación de problemas de programación matemática y optimización, que esta compuesto por un lenguaje compilador integrado a un grupo de *solvers* de alto rendimiento. Principalmentefue diseñado para :

- La optimización de problemas: lineales, no lineales, enteros y cualquier combinación de ellos, entre otros.
- Proporcionar un lenguaje basado en la álgebra para representar de manera compacta modelos grandes y complejos.
- Admitir de forma rápida y segura cambios en las especificaciones del modelo.
- Calcular sentencias de relaciones algebraicas omitiendo ambigüedades.

- Facilitar la verificación de que el modelo creado sea el correcto, tratando de propagar la expansión de contextos, en un ambiente que este basado en subíndices, cierta expansibilidad y dar acceso al usuario de empezar con un conjunto pequeño de datos.
- Permitir la expansión de los nombres de las variables, describir la función de ecuaciones, índices, definición de datos como comentarios, siendo inherentemente documentado.

El software *GAMS* está diseñado para que la estructura del modelo, suposiciones, y cualquier proceso de cálculo usado en reporte escrito sea documentado como un archivo autocontenido.

Dentro de lo descrito anteriormente, *GAMS* puede incluir en el proceso de automatización del modelo lo siguiente:

1. acceso a cálculo de datos;
2. verificar la estructura correcta de las sentencias algebraicas del modelo;
3. evitar la formulación de fallos obvios;
4. interactuar con un solver;
5. guardar y presentar una base avanzada cuando se generan soluciones relacionadas;
6. tener uso de la solución para reportes escritos.

A.2 GENERALIDADES DE *Cplex*

La solución que realiza *Cplex* de problemas lineales la lleva a cabo utilizando alternadamente varios algoritmos. Por ejemplo, el algoritmo dual simple más avanzado de *Cplex* es utilizado para resolver la mayoría de los problemas lineales debido a que son

resultados mejor con este, así mismo otro cierto tipo de problemas se resuelven mejor utilizando el algoritmo primal simplex, el optimizador pars redes, el algoritmo de barrera, o el algoritmo de exploración. Existe la opción paralela si esta activada, resuelve diversos algoritmos en paralelo y da la respuesta del primero que se termine.

A pesar de que para la memoria es muy intensivo resolver problemas de programación lineal, *Cplex* las realiza de manera eficiente. La escasez de la memoria física es un problema común al momento de resolver un problema de grandes dimensiones; en caso de ser memoria limitada, *Cplex* automáticamente hará los ajustes para no impactar negativamente en el funcionamiento.

El diseño de *Cplex* está hecho bajo varios escenarios por defecto la mayoría de los problemas lineales. Tales escenarios proporcionan la mejor velocidad y confiabilidad de la optimización del problema. Sin embargo, en varias ocasiones, hay razones para modificar las opciones para la mejora del funcionamiento, evitar dificultades numéricas y tener el control de la duración de la optimización, o las opciones de salida.

Existen diferencias entre el tiempo de solución de los problemas resueltos con el algoritmo primal simplex o con el algoritmo dual simplex, es poco común que un problema cuente con un funcionamiento numérico pobre en ambos algoritmos.

Cplex cuenta con un algoritmo para modelos de red muy eficiente. Las características que poseen las restricciones son las siguientes:

- los coeficientes distintos a 0 son +1 ó -1;
- cada una de las columnas de las restricciones tiene exactamente 2 entradas distintas a cero, una con coeficiente +1 y otra con -1.

Cplex cuenta con un algoritmo de exploración que podría ser eficaz en problemas que cuentan con muchas más variables que ecuaciones. Lo que hace tal algoritmo es solucionar una sucesión de subproblemas lineales que a partir de los resultados obtenidos de un subproblema se seleccionan las columnas del modelo original que se incluirán en el

siguiente subproblema.

Otra de las funciones que maneja *GAMS/Cplex* es el acceso al *Cplex Infeasibility Finder*, el cual es un buscador de infactibilidad que toma un problema lineal infactible y origina un conjunto de restricciones inconsistentes irreductibles (IIS), el cual es un conjunto de restricciones y de cotas para las variables que lo hacen infactible, eliminando cualquier miembro del sistema para hacerlo factible. En *GAMS/Cplex*, el reporte IIS está dentro en términos de las ecuaciones de *GAMS* y de los nombres de las variables.

Para solucionar problemas de tipo entero-puro y mixto es necesario usar métodos que realicen más cálculos matemáticos que los empleados para problemas lineales puros que cuenten con las mismas condiciones. El tiempo de solución para resolver un problema de programación entera relativamente pequeño, es enorme.

Un algoritmo utilizado por *Cplex* para problemas con variables enteras, es el de ramificar y acotar, el cual consiste en solucionar una serie de subproblemas. Un problema entero mixto es muy agotador computacionalmente por la gran cantidad de subproblemas que genera y la demasiada memoria física que requiere para solucionarse.

A.3 *GAMS/Cplex*

Un solver de *GAMS* que brinda acceso a los usuarios de combinar el alto nivel de modelación de *GAMS* y el poder de los optimizadores de *Cplex* es el *GAMS/Cplex*. El diseño con el que cuentan los ordenadores de *Cplex* es para solucionar problemas grandes y complicados en un corto tiempo y de ser posible, una mínima mediación del usuario. Para los problemas de programación lineal, cuadrática, problemas con restricciones y enteros mixtos, da acceso (con licencia apropiada) a los algoritmos de solución de *Cplex*. Además, *GAMS/Cplex* cuenta con diversas opciones de solución disponibles que para la mayoría de las opciones de problemas específicos, calculan y fijan automáticamente los mejores valores. *GAMS/Cplex* cuenta con todas las opciones de *Cplex*.

Para más información sobre *GAMS*, *Cplex* y *GAMS/Cplex*, ver [7] y [8] y por la vía web www.gams.com y www.cplex.com.

APÉNDICE B

RESULTADOS DEL ESTUDIO

B.1 HORAS DE DESCANSO DE LOS USUARIOS

Al estudiar los riesgos ergonómicos y psicosociales, nos encontramos con una referencia constante a la fatiga, en sus distintas modalidades: física, mental, emocional, sensorial. Ésta se hace presente bien como desencadenante de dificultades, lesiones o enfermedades o bien como consecuencia de ellas, y va ligada habitualmente al esfuerzo, puntual o sostenido. La fatiga es un indicador de que algo debe ser atendido, bien en nosotros, bien en las condiciones de trabajo o en su organización.

En general, el absentismo laboral de corta duración es el que más se relaciona con la fatiga mental o nerviosa. Estas ausencias de corta duración se deben a la necesidad de descanso del propio cuerpo. Los síntomas son muy variados: trastornos musculoesqueléticos, dolores de cabeza, molestias digestivas, entre otros. La recuperación sólo es efectiva durante un período breve de tiempo si se mantienen las condiciones que fomentan la aparición de la fatiga.

Factores que tienden a producir fatiga:

1. Constitución del individuo.
2. Tipo de trabajo.

3. Condiciones del trabajo.
4. Monotonía y tedio.
5. Esfuerzo físico y mental.
6. Alimentación.
7. Tiempo de duración del trabajo.

Para nuestra tesis, examinaremos el factor 5 aunado al factor 7, revisando las horas de descanso que se correlacionan directamente con la partida de los autobuses.

En la siguiente gráfica, los indicadores de fatiga en ingeniería industrial han disminuido debido al descanso por usuario, impactando directamente en el tiempo de valor agregado disponible durante el día. Se considera un índice de fatiga del 15 % como normal [13] considerando el cálculo nuevo en 8 %, lo que aumenta la productividad del número de piezas por operador en área de mezclado y menor tiempo muerto para el área de armado, acorde a resultados obtenidos según los análisis de tiempos y movimientos.

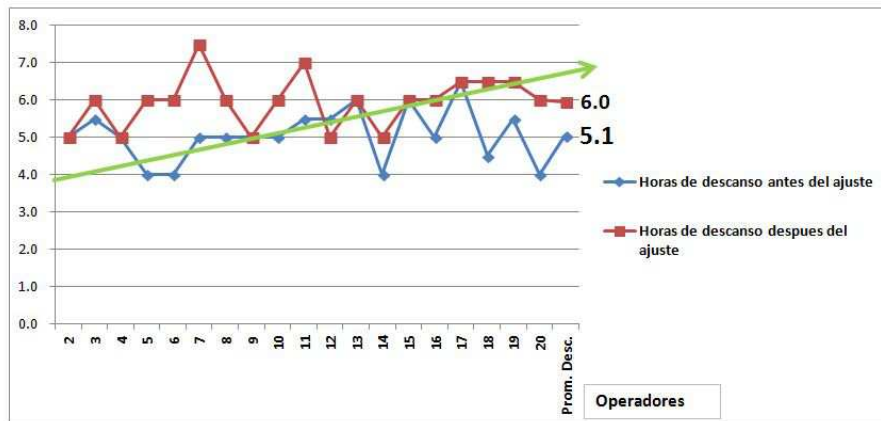


Figura B.1: Descanso de usuarios: correlación directa a la fatiga.

B.2 REGISTRO DE HORAS DE LLEGADA DE LOS AUTOBUSES PROMEDIO

El gráfico que se presenta a continuación indica la hora de llegada al autobus, antes del ajuste (noviembre) y después del ajuste (febrero):

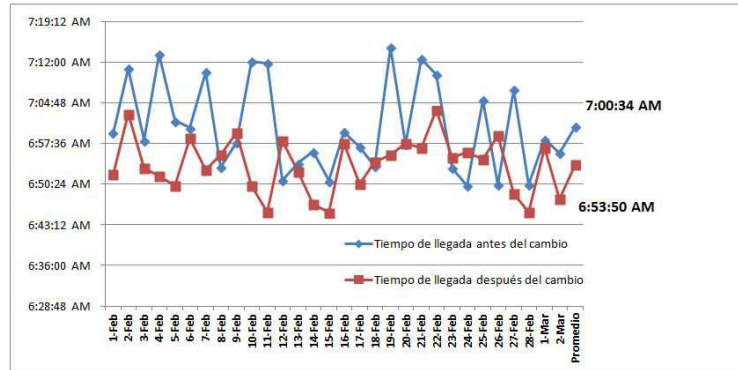


Figura B.2: Horas de llegada en promedio antes y después del ajuste.

B.3 GRÁFICO COMPARATIVO DE LLEGADAS

El gráfico que se muestra a continuación indica la cantidad de demoras durante el mes de noviembre (previo al cambio) en comparativa con las llegadas del mes de marzo del presente año:

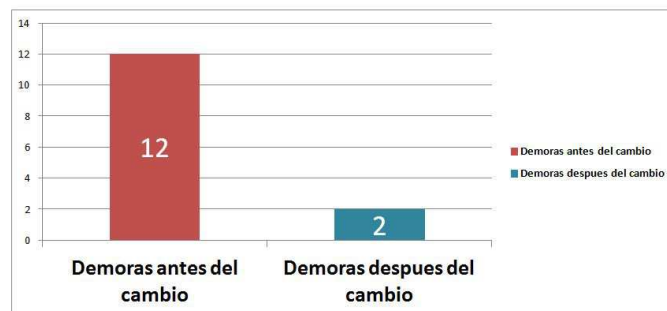


Figura B.3: Cantidad de demoras antes y después del ajuste.

APÉNDICE C

RUTEOS DE NUEVOS TRAYECTOS ACORDE A EXPERIMENTO

C.1 RESUMEN GENERAL DE NUEVOS TRAYECTOS

A manera de resumen, las rutas críticas se lograron ajustar de acuerdo a la demanda:

Ruta	Capacidad Max	Uso promedio	%	
San Roque	39	25	65 %	No se presenta personal de pie, la ruta se ajusta a la demanda
Casa Blanca	39	25	65 %	La ruta acapara demanda debido al nuevo ruteo
Colón	39	27	71 %	
Lincoln	39	22	57 %	

Tabla C.1: Resumen final, eliminando ruta extra.

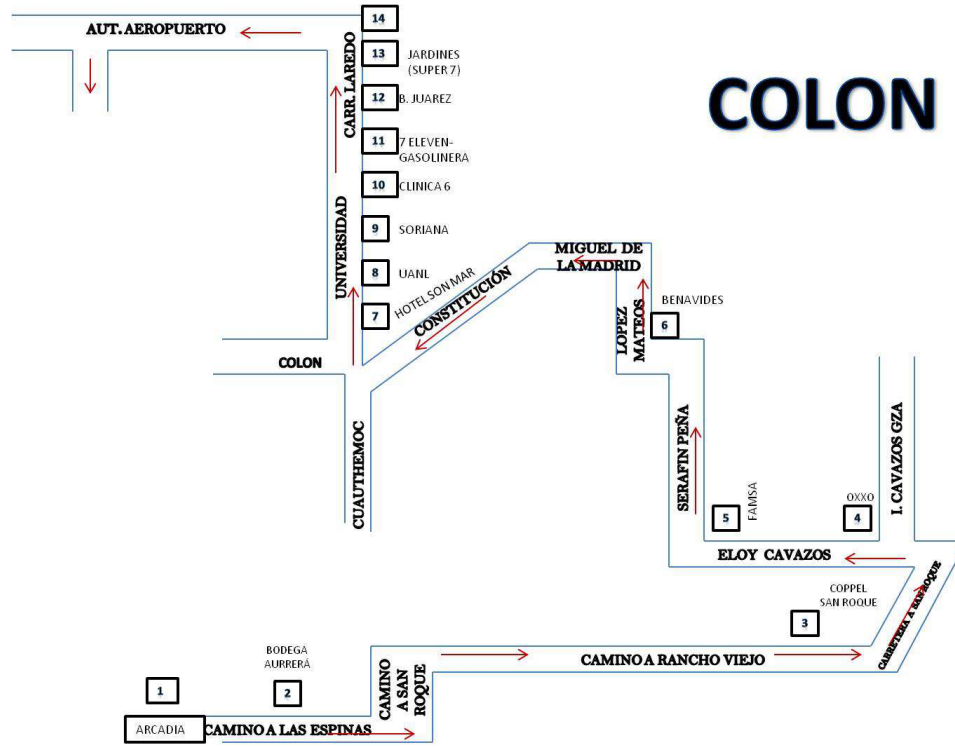


Figura C.1: Rediseño de la ruta Colón.

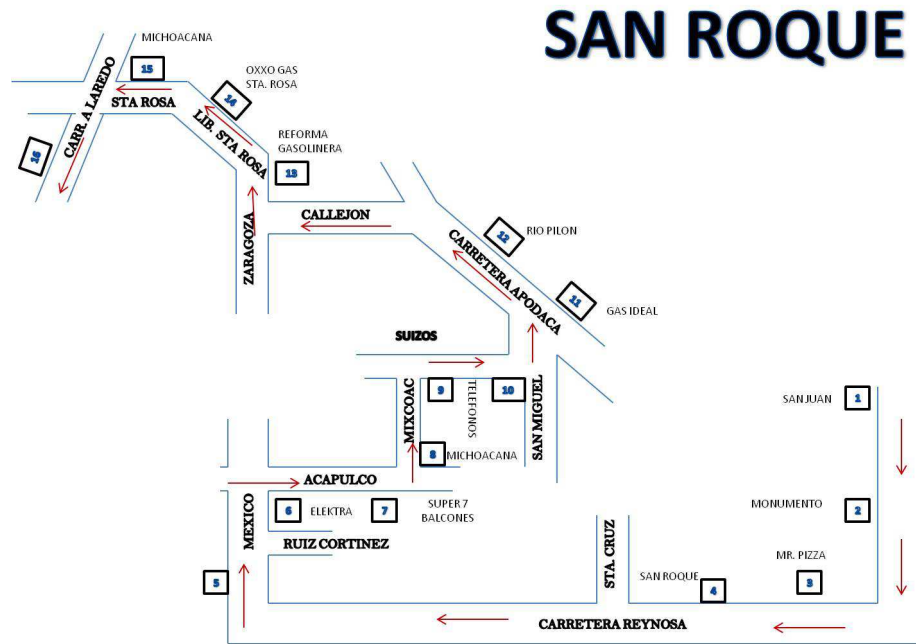


Figura C.2: Rediseño de la ruta San Roque.

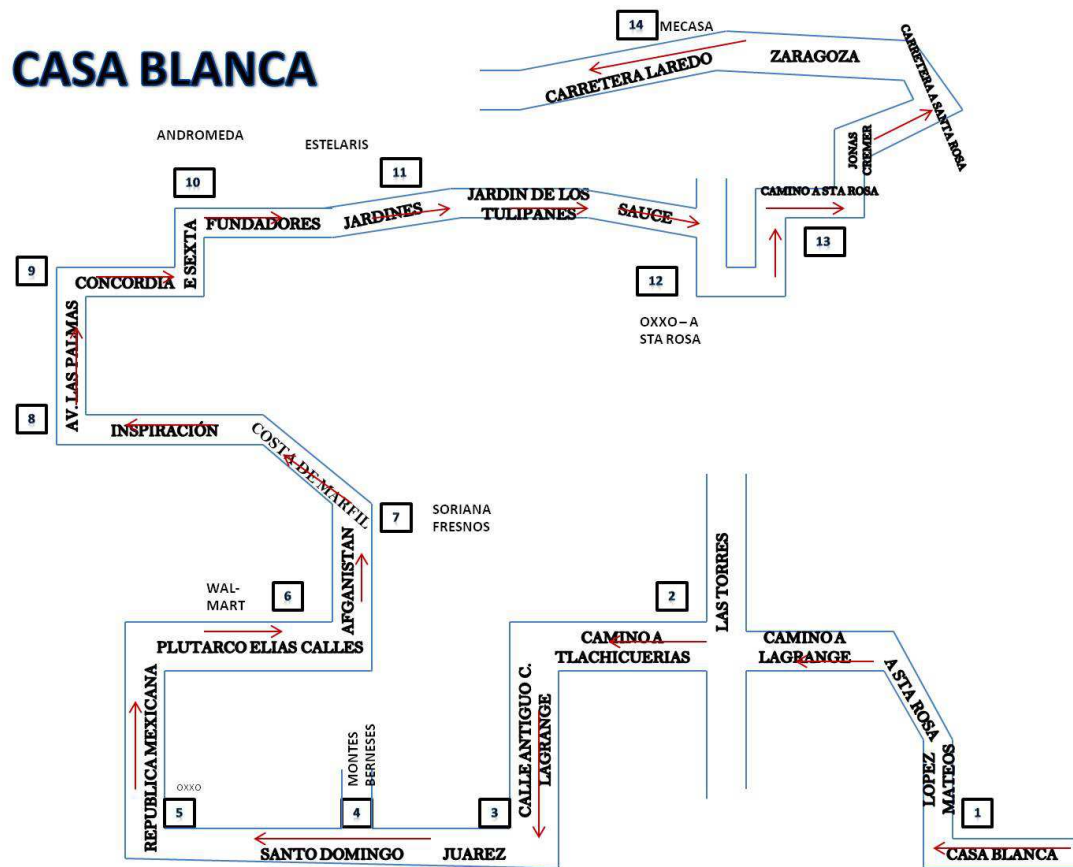


Figura C.3: Rediseño de la ruta Casa Blanca.

LINCOLN

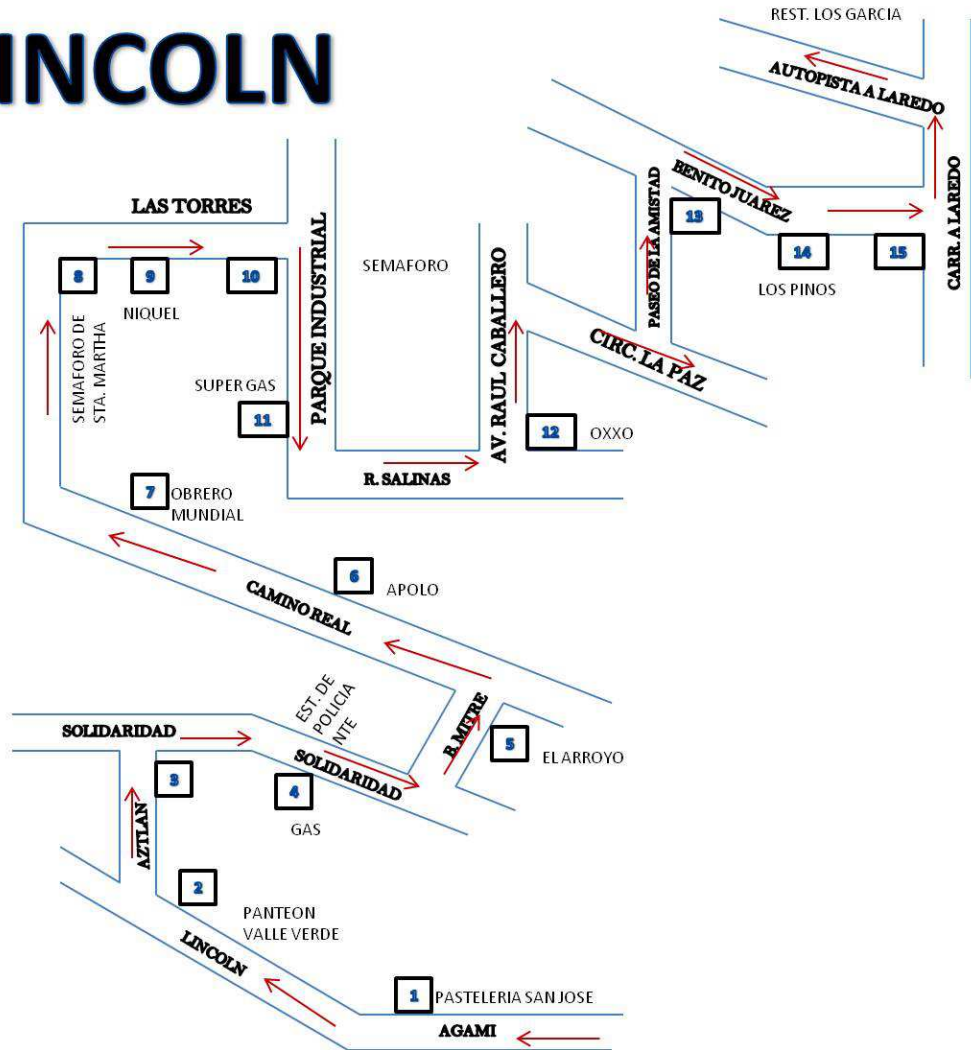


Figura C.4: Rediseño de la ruta Lincoln.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABSI, N., C. ARCHETTI, S. DAUZÉRE-PÉRÉS y D. FEILLET, «An iterative two-phase heuristic approach for the Production Routing Problem», *Transportation Science*, págs. 1–12, 2015.
- [2] AGBEGHA, G. Y., R. H. BALLOU y K. MATHUR, «Optimizing Auto-Carrier Loading», *Transportation Science*, **32**(2), págs. 174–188, 1998, URL <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.32.2.174>.
- [3] BALTZ, A., D. P. DUBHASHI, A. SRIVASTAV, L. TANSINI y S. WERTH, «Probabilistic Analysis for a Multiple Depot Vehicle Routing Problem», *Random Structure and Algorithms*, págs. 1775–1783, 2007.
- [4] BARROSO, L. F., «Estudio del sistema de transporte urbano colectivo en el área metropolitana de Monterrey», , 1994.
- [5] CANO, I., *Asignación de recursos de transporte: enfoque práctico*, M.c. tesis, México, 2005.
- [6] CLARKE, G. y J. WRIGHT, *Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points*, tomo 12, Operations Research, USA, 1964.
- [7] CORPORATION, G. D., *GAMS/CPLEX 10 Solver Manual*, URL <http://www.gams.com/dd/docs/solvers/cplex.pdf>.
- [8] CORPORATION, G. D., *GAMS/SBB Solver Manual*, Washington, DC, 2002, URL <http://www.gams.com/dd/docs/solvers/sbb.pdf>.

- [9] DANTZIG, G., R. FULKERSON y S. JOHNSON, «Solution of a large-scale traveling-salesman problem», *Operations Research*, **2**, págs. 393–410, 1954.
- [10] DANTZIG, G. B. y R. RAMSER, «The truck dispatching problem», *Management science* **6**, **6**(1), págs. 80–91, 1982.
- [11] DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, M. S., *Historia de las comunicaciones y los transportes en México: El autotransporte*, número v. 1 en Historia de las comunicaciones y los transportes en México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1988, URL <https://books.google.com.mx/books?id=9e22AAAAIAAJ>.
- [12] FISHER, M., A. JIN y A. PARRY, «ON THE STIFFNESS OF AN INTERFACE NEAR A WALL», , págs. 357–361, 1994, URL http://gateway.webofknowledge.com/gateway/Gateway.cgi?GWVersion=2&SrcApp=PARTNER_APP&SrcAuth=LinksAMR&KeyUT=WOS:A1994NJ60700013&DestLinkType=FullRecord&DestApp=ALL_WOS&UsrCustomerID=1ba7043ffcc86c417c072aa74d649202.
- [13] GARCÍA CRIOLLO, R., *Estudio del trabajo*, tomo 2, primera edición, Mc Graw Hill, 1997.
- [14] GHIANI, G., D. LAGANÁ, G. LAPORTE y F. MARI, «An ant colony heuristic for the arc routing problem with intermediate facilities under capacity and length restrictions», *Heuristics*, **16**, págs. 211–233, 1 2010.
- [15] ISLAS RIVERA, V., *Estructura y desarrollo del sector transporte en México*, El Colegio de México, México, 1990.
- [16] JACOBS, P. S., «Introduction: Text Power and Intelligent Systems», en P. S. Jacobs (editor), *Text-Based Intelligent Systems: Current Research and Practice in Information Extraction and Retrieval*, Erlbaum, Hillsdale, págs. 1–8, 1992.
- [17] JOZEFOWIEZ, N., G. LAPORTE y F. SEMET, «A generic branch-and-cut algorithm for multi-objective optimization problems: Application to the multi-modal traveling salesman problem», *INFORMS Journal on Computing*, **24**, págs. 554–564, jan 2012.

- [18] JOZEFOWIEZ, N., F. SEMET y E.-G. TALBI, «Parallel and Hybrid Models for Multi-objective Optimization: Application to the Vehicle Routing Problem», *j-LECT-NOTES-COMP-SCI*, **2439**, págs. 271–??, 2002, URL <http://link.springer.de/link/service/series/0558/papers/2439/24390271.pdf>.
- [19] KARA, I., G. LAPORTE y T. BEKTAS, «A note on the lifted Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints for the capacitated vehicle routing problem», *European Journal of Operational Research*, **158**, págs. 793–795, jan 2004.
- [20] LEE, T. y J. UENG, *A study of vehicle routing problems with load balancing*, tomo 29, International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, New York, USA., 1999.
- [21] LEI, H., G. LAPORTE y B. GUO, «The capacitated vehicle routing problem with stochastic demands and time windows», *Computers and Operations Research*, **38**, págs. 1775–1783, jan 2011.
- [22] MARTÍ, R., D. D. I. I. OPERATIVA y F. D. MATEMÁTICAS, «Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria», , 1998.
- [23] MILLER, C. E., A. W. TUCKER y R. A. ZEMLIN, «Integer Programming Formulations and Traveling Salesman Problems», *Journal of the Association for Computing Machinery*, **7**, págs. 326–329, 1960.
- [24] PISINGER, D., «Algorithms for Knapsack Problems», , 1995.
- [25] RIGHINI, G. y M. SALANI, «Symmetry helps: Bounded bi-directional dynamic programming for the elementary shortest path problem with resource constraints», *Discrete Optimization*, **3**(3), págs. 255–273, 2006.
- [26] ROPKE, S. y D. PISINGER, «An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows», *TRANSPORTATION SCIENCE*, **40**(4), págs. 455–472, 2006.
- [27] SPADA, H., A. MEIER, N. RUMMEL y S. HAUSER, *A new method to assess the quality of collaborative process in CSCL*, Tesis de Maestría, Mahwah, NJ, 2005.

-
- [28] WOEGINGER, G. J., «Exact algorithms for NP-hard problems: A survey», *Combinatorial Optimization - Eureka, You Shrink!*, LNCS, págs. 185–207, 2003.
- [29] ZENG, Q. y K. C. MOUSKOS, «Heuristic search strategies to solve . . .», , 1997.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Luis Carlos Luna López

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Logística y Cadena de Suministro
con orientación en Diseño y Análisis

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

LOCALIZACIÓN DE PARADAS Y DISEÑO ÓPTIMO DE RUTAS PARA
TRANSPORTE DE PERSONAL

Hijo de Guillermo Luna Flores y Graciela López Castilleja, nacido en Monterrey Nuevo León, México. Graduado de la carrera de Ingeniero Industrial Administrador en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León del 2005 al 2009. Actualmente desempeño labores en la industria hulera como ingeniero industrial de área.