

DIAGNÓSTICO DE LA MOVILIDAD DE PASAJEROS ENTRE LA VIRGINIA Y PEREIRA

ANGELA DANIELA LOZANO VALENCIA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PEREIRA, NOVIEMBRE DE 2014**

**DIAGNÓSTICO DE LA MOVILIDAD DE PASAJEROS ENTRE LA VIRGINIA Y
PEREIRA**

ANGELA DANIELA LOZANO VALENCIA

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL**

DIRECTORA:

MSc. ELIANA MIRLEDY TORO OCAMPO

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PEREIRA, NOVIEMBRE DE 2014**

Nota de Aceptación:

**MSc. Maria Elena Bernal Loaiza
Jurado**

**MSc. Eliana Miredy Toro O.
Directora**

Pereira, Colombia. Noviembre de 2014

Dedicatoria

A Dios quien es el que ha permitido que pueda culminar mis estudios.

A mis padres que durante toda mi vida han creído en mí y no han dudado en apoyarme en cada decisión y a mi hermano que me da tantas alegrías.

A mi esposo por su amor y apoyo.

Agradecimientos

A la profesora Eliana por su tiempo, dedicación y confianza en el trabajo.

A la empresa “Núcleo Constructora” por el apoyo brindado cada semestre, el cual facilitó este proceso de formación como ingeniera.

A la facultad de Ingeniería Industrial por brindarme la formación y acompañamiento durante mis estudios.

A la vicerrectoría de investigación por su apoyo en la financiación del proyecto.

Contenido

Pág.

Resumen	8
Abstract.....	8
1. OBJETIVOS	9
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	9
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2. JUSTIFICACIÓN	9
3. ESTADO DEL ARTE	10
4. POBLACIÓN AFECTADA.....	16
5. DIAGNÓSTICO SOCIAL.....	19
6. DEFINICIÓN DE PROBLEMAS	25
6.1. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN	25
6.2. PROBLEMA DE DETERMINACIÓN DE FRECUENCIA DE SALIDA.....	27
6.2.1. Método de carga máxima	27
6.2.2. Modelo de Ceder y Wilson.....	29
6.3. PROBLEMA DE DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE FLOTA.....	30
6.3.1. Fórmula de determinación del tamaño de flota	31
6.3.2. Modelo de Baaj y Mahmassani.....	31
6.3.3. Modelo propuesto por Israeli y Ceder.....	33
6.3.4. Modelo propuesto por Ngamchai y Lovell.....	33
6.4 PROBLEMA DE DETERMINACIÓN DE HORARIOS (SCHEDULING) DE OPERACIÓN CON SINCRONIZACIÓN EN UN SISTEMA DE TRANSPORTE.....	36
6.4.1. Modelo propuesto por Ceder, Golany y Tal (2001)	36
6.4.2. Modelo de optimización de frecuencias en BRT	38
6.5. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE TURNOS A CONDUCTORES	42
6.5.1. Modelo de asignación:	42
6.5.2. Modelo de asignación de turnos para la operación de sistemas de transporte masivo tipo BRT	44

6.5.3. Algoritmo genético como técnica de solución al problema de asignación de conductores a los despachos (creación de itinerarios)	45
6.5.4. Método de Branch & Price para solucionar problema de generación de turnos	46
7. DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS EN LA RUTA 27	47
7.1. REQUERIMIENTOS DEL USUARIO	48
7.1.1. La disponibilidad.....	48
7.1.2. Puntualidad	50
7.1.3. Tiempo de viaje	50
7.1.4. Comodidad	50
7.1.5. La conveniencia.....	51
7.1.6. La seguridad	51
7.1.7. Costo	52
7.2. REQUERIMIENTOS DE LA COMUNIDAD	53
7.2.1. Calidad del servicio.....	53
6.2.2. Objetivos sociales	53
7.2.3. Impactos al medio ambiente.....	54
8. RELACIÓN ENTRE PROBLEMAS DE PLANIFICACIÓN DE TRANSPORTE	54
9. PROPUESTA DE INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	57
9.1. FORMATO DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE DEMANDA DE PASAJEROS RUTA 27 DILIGENCIADO POR EL ENCUESTADOR.....	58
9.2. FORMATO PROPUESTA DE ENCUESTA PARA SER AUTODILIGENCIADA POR LOS USUARIOS.....	58
9.3. RECOMENDACIONES Y ACLARACIONES SOBRE LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE DEMANDA DE PASAJEROS Y ENCUESTA EN LA RUTA 27	60
10. CONCLUSIONES.....	61
11. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	63

Resumen

En el presente trabajo se encuentra plasmado un diagnóstico de los problemas que afrontan los usuarios de la ruta 27 en especial los que corresponden a habitantes de La Virginia. Dichos problemas fueron evidenciados al analizar los diferentes requerimientos que tienen los usuarios de la ruta, puesto que se encontraron falencias y no cumplimientos de los mismos, producto de la falta de planificación de la operación de la ruta. Con los problemas definidos, se hizo una revisión de algunos modelos matemáticos asociados a los problemas detectados, identificando los datos de entrada de los modelos y los datos de salida que estos generan al ser solucionados. Adicional se revisaron algunos métodos de solución en especial metaheurísticas aplicadas a los modelos analizados, las cuales son muy utilizadas por los tiempos cortos de ejecución y buena calidad de los resultados. Al tener claros los datos de entrada y salida fue posible encontrar una relación entre los problemas definidos, para así determinar el orden en que deben ser abordados. Por último se proponen dos formatos de recolección de información de la demanda que permite recopilar no solo información correspondiente al número de pasajeros por tramo y por franjas horarias, sino también información para caracterizar la demanda de acuerdo a atributos de motivo de viaje, frecuencia de viaje, etc.

Abstract

The present work present a diagnostic of the problems that faced the route 27 users, in special the users of La Virginia. These problems were evidenced by analyzing the different requirements that have the users of the route, inasmuch as were found faults and noncompliance, product of the lack of planning for the operation of the route. With the problems identified, was done a review of some mathematical models associated to detected problems, identifying the input data of the models and the output data that they generate to be solved. Additional some solution methods were reviewed especially metaheuristics applied to the analyzed models, which are widely used for his short runtimes and quality of results. Having clear the input and output data was possible to find a relationship between the problems identified, to determine the order in which they should be solved. Finally, are proposed two data collection formats demand that allows to collect information not only for the number of passengers for stretch and for the time of de day, but also information to characterize the demand according to attributes as the trip purpose, the trip frequency, etc.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un panorama general de las problemáticas que se encuentran al revisar la movilidad entre Pereira y La Virginia, proponiendo algunos modelos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los problemas asociados a la movilidad de pasajeros y realizar una revisión del estado del arte de cada uno de ellos.
- Revisar los modelos matemáticos de optimización, como Scheduling, Asignación de conductores, ruteo, caracterización de la demanda, tarifas, BRTS, que estén afectando el transporte público entre Pereira y La Virginia.
- Revisar las técnicas de solución aplicadas a cada problemática.

2. JUSTIFICACIÓN

Aunque la ruta de La Virginia o ruta 27 que es el número que la representa según la AMCO, lleva varios años funcionando de la misma manera, es decir, basado en empirismos, y así se ha mantenido transportando a los ciudadanos de La Virginia, definitivamente la calidad del servicio refleja la falta de una buena planeación; por lo que se ve la necesidad de identificar los problemas que están afectando a esta ruta, lo que repercute directamente en los usuarios, quienes cada día a pesar de la falta de calidad hacen uso de ella, ya que es la única alternativa al alcance de su economía, que tienen para desplazarse a Pereira.

En respuesta a la necesidad, nace la intención de en el presente trabajo de grado realizar un diagnóstico, que presente un estado del arte de los problemas asociados a la planificación del transporte urbano y que contenga los modelos que recogen los problemas y las técnicas que se han usado, para resolverlos, reconociendo así cuales son los datos que se necesitan para alimentar el modelo, todo esto con el fin de que sirvan como punto de inicio para desarrollar otros trabajos de pregrado y de maestría

3. ESTADO DEL ARTE

Dentro de cualquier planificación o formulación de un proyecto, un diagnóstico es primordial para conocer la realidad, identificar las debilidades y problemas, las posibles causas de estos y de esta manera contemplar que posibilidades existen para atender a los problemas. Este debe ser el primer paso, con el fin de que ya en el transcurso de la planificación, se estudian las alternativas para elegir el mejor curso de acción y estrategias a seguir.

Es importante conocer los componentes de una planificación de transporte para así determinar la orientación del diagnóstico con el fin de detectar inconvenientes que en un futuro puedan obstaculizar la operación del servicio en cuanto a la eficiencia.

Dada la intención de integración de la ruta 27 al MEGABUS, los componentes que se deben tener en cuenta a la hora de integrar dicha ruta al sistema son los siguientes:

- Intercambiadores: Los intercambiadores son las instalaciones fijas creadas para realizar transbordos entre distintos servicios. Su tamaño y diseño (distribución de espacios, servicios complementarios, etc.) dependen enteramente del número de servicios que los utilizan y de la demanda asociada a los mismos.

Su ubicación es un aspecto clave para mejorar las prestaciones del sistema, especialmente en lo que a tiempos de viaje se refiere.

- Diseño de rutas y horarios: Es imprescindible diseñar las rutas de una red teniendo en cuenta que la necesidad de transferencia entre líneas (como mínimo las vertebradas del sistema) puede obligar a realizar un cierto número de paradas para dar mayor conectividad a la red. En el caso de que existan alternativas a un cierto trayecto es posible crear conexiones rápidas sin paradas intermedias, pero por lo general debería primar la existencia de una cierta oferta de trayectos a la velocidad comercial de una sola ruta.

Al diseñar los horarios teniendo en cuenta la coordinación entre líneas aparece el problema de que a medida que la red crece más difícil es garantizar los intercambios coordinados. Si una ruta tiene varias paradas de transferencia, a su paso por ellas es necesario que las otras rutas coordinen su paso por las mismas. Pero si estas otras rutas tienen también varias paradas de transferencia será más difícil coordinarlas y así sucesivamente. Y por esto es importante antes que todo caracterizar la demanda para conocer la frecuencia de salida de la ruta, si esta debe

tener frecuencias diferenciadas de acuerdo a la franja horaria, al día de la semana; ya determinado esto se da paso a la coordinación de rutas, con el fin de definir las rutas y horarios de la forma más efectiva y eficiente para satisfacer las demandas de movilidad de un determinado territorio, dados sus condicionantes específicos.

- Garantías de servicio: Los posibles excesos de demanda (previstos e imprevistos) y las incidencias (retrasos, interrupciones, accidentes, etc.) en partes de la red pueden ser reconducidos de forma eficaz si la integración del sistema se ha alcanzado satisfactoriamente. Los remedios para este tipo de situaciones son básicamente:

I. Información dinámica para reducir la incertidumbre de los clientes y, en consecuencia, su grado de insatisfacción.

II. Provisión de servicios adicionales (o de emergencia) para suplir las conexiones no satisfechas por culpa de los retrasos, las expediciones canceladas por avería o accidente, los excesos de demanda, etc.

Por lo tanto, las garantías de servicio dependen de la disponibilidad de vehículos y conductores de forma rápida en cualquier punto de la red, lo cual es totalmente inviable para un operador de forma aislada. Por ello, en la medida que la integración operativa se materializa es importante planificar los recursos disponibles en cada momento y lugar para utilizar en caso de necesidad inmediata. Este tipo de garantías va más allá de los operadores pues presupone que existen acuerdos de colaboración (con las indemnizaciones económicas pertinentes) entre todos ellos, de forma que todos los operadores cooperan para mantener elevada la calidad del sistema mediante el mantenimiento de la fiabilidad en los servicios.

Sumado a los tres componentes anteriores, para la ruta en cuestión es importante también incluir la determinación del parque automotor de acuerdo a la demanda que se haya determinado con el fin de que no se presenten excesos de demanda ni de oferta en las horas del servicio.

Cada uno de los esfuerzos que se hacen a la hora de planificar es pensando en que el sistema funcione eficientemente ya que desde un punto de vista objetivo los SITP son implementados con el fin de solucionar los problemas de transporte urbano generados por el crecimiento de la población al interior de las ciudades y la necesidades que tienen las personas de movilizarse constantemente.

Dicho lo anterior, esa eficiencia del sistema se traduce a los usuarios en calidad del servicio que ellos reciben, pero esto aunque es el deber ser, está muy alejado de la realidad, pues el transporte poco se planifica ya que no se piensa en los usuarios, sin darse cuenta que de la planificación se ven beneficiados todos, pues a la falta de esta vienen inconvenientes y problemas de operación, técnicos, entre otros, que solo generan sobre costos. De esta manera, algunos de los factores de calidad en el transporte a los que se les debe dar cumplimiento desde la planificación son: tiempo de recorrido, capacidad, impacto al tránsito, económico, mantenimiento y construcción, seguridad, prestación del servicio y disponibilidad.

Todos estos factores de los que se hablaron anteriormente hacen parte de la operación del transporte y el servicio de transporte. La primera incluye elementos como:

- Establecimiento de horarios.
- Asignación de jornadas de trabajo.
- Supervisión, control.
- Mecanismo de cobro.
- Mantenimiento.

Ahora bien, cuando se habla del servicio de transporte se considera la forma en la que el usuario percibe el transporte teniendo en cuenta elementos como:

- Calidad del servicio.
- Seguridad.
- Información que recibe el usuario, entre otros.

El servicio de transporte público orientado a suplir necesidades siendo la general transportarse, debe reconocer los 3 actores que intervienen y se interrelacionan [1], entendiendo que cada uno tiene sus propios intereses que incluso pueden ir en contra de los intereses del otros, por lo que se hace necesario detectar que necesidades están siendo satisfechas y cuáles no. Los actores son:

- El usuario
- El proveedor
- La comunidad.

A continuación en la Tabla 1 se encuentran las necesidades más latentes en cada uno de los grupos:

REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE		
Usuario (Consumidor)	Prestatario (Proveedor)	Comunidad (Evaluador)
Disponibilidad	Cobertura del sistema	Calidad del servicio
Puntualidad	Confiabilidad	Costos del sistema
Tiempo de recorrido	Velocidad	Objetivos sociales
Comodidad	Capacidad	Impactos al medio ambiente
Conveniencia	Flexibilidad	Consumo de energía
Seguridad	Seguridad	Impactos a largo plazo
Costos al usuario	Costos	
	Atracción de usuarios	
	Efectos complementarios	

Tabla 1. Requerimientos de un sistema de transporte.

Fuente: TRANSPORTE PÚBLICO, planeación, diseño, operación y administración.

A partir de todo lo referenciado anteriormente que permite dar una mirada global a lo que incluye la planificación del transporte, se pueden detectar problemas de la misma, lo que hace parte del diagnóstico. Cuando se realiza un diagnóstico la planificación debe acompañarlo con las posibles soluciones que se pueden dar a los problemas que se detecten, en este orden de ideas, para este caso particular son los modelos matemáticos y las técnicas de solución, las alternativas que se proponen para mejorar lo que se diagnostica, basado en lo que existe en adelantos de investigación en el tema.

Las mejoras a procesos, funciones, plantas y en este caso a la operación de transporte público pueden darse a partir de problemas de optimización que se plantean por medio de formulaciones matemáticas las cuales recogen las características del problema y el objetivo principal del mismo el cual puede ser minimizar o maximizar algún recurso, costo, beneficio, etc., esto va dependiendo del problema.

Dentro del amplio tema de planificación y operación de transporte, la investigación ha desarrollado diferentes formulaciones matemáticas que representan los problemas más comunes a los que se enfrenta alguien a la hora de planificar, teniendo en cuenta los diagnósticos que permiten caracterizar el problema. Dentro de estos está:

- VRP (vehicle routing problema) [2]: El Vehicle Routing Problem (VRP) es una de las tareas de optimización combinatoria más desafiante. Definido hace más de 40 años, este problema consiste en diseñar el conjunto óptimo de rutas para flota de vehículos con el fin de servir a un conjunto dado de clientes. El interés en la VRP está motivada por su relevancia práctica, así como por su gran dificultad.
- Scheduling of vehicles [3]: este problema consiste en la asignación de vehículos para cubrir los viajes programados para una ruta durante un periodo determinado.
- LRP (Location routing problem) [4]: busca determinar un conjunto de instalaciones potenciales, llamados depósitos, las cuales tienen asociados unos costos iniciales y responden a la ubicación de la demanda y el trayecto de las rutas. Estas instalaciones deben ser visitadas por las rutas de una manera óptima.
- Synchronization Bus Timetabling Problem [5]: La generación de horarios es un subproblema de la red de autobuses de planificación estratégica, en la que se determina la hora de salida de cada viaje, minimizando la ventana de tiempo que existe entre la llegada de rutas de conexión al mismo punto.

Estos problemas son del tipo NP completo, lo que quiere decir que no se puede resolver de manera tradicional con el cálculo continuo, por lo que se aborda el problema desde la optimización. Para optimizar estos problemas, los cuales al ser de la vida real manejan gran cantidad de variables y presentan el fenómeno de explosión combinatorial, se hace uso de las técnicas de optimización, como heurísticas y metaheurísticas las cuales permiten llegar a respuestas de muy buena calidad a esos problemas combinatoriales.

Casi todos los problemas pueden ser abordados desde las diferentes heurísticas y metaheurísticas que existen pero para cada uno existen algoritmos que encuentran una respuesta más óptima. A continuación se muestra como desde la definición del VRP se han aplicado diferentes métodos exactos y aproximados (heurísticas y metaheurísticas) con el fin de lograr una respuesta óptima. Cabe resaltar que desde los métodos exactos se llega a la respuesta óptima, pero solo puede ser usado para

problemas pequeños, mientras que con los métodos aproximados se puede abordar el problema independientemente del tamaño pero sin garantizar la respuesta óptima.

- Para la solución del VRP se han desarrollado varios algoritmos que se pueden dividir en exactos y en aproximados. Dentro de los exactos están los basados en Branch and Bound, Branch and Cut y Partición de conjuntos-Generación de columnas.
- Dentro de los autores que han usado los algoritmos de Branch and Bound se encuentran Laporte, Mercure y Nobert [6]; Fischetti, Toth y Vigo [7]; y Fischer [8]. La idea de estos trabajos es la de dar cotas inferiores a las soluciones de los respectivos problemas, por medio de relajaciones de las variables enteras o eliminación de algunas restricciones. Con estas relajaciones se llega a problemas conocidos en la literatura con soluciones rápidas y que representan cotas para el valor del problema original.
- Los algoritmos de tipo R&C proponen la agregación de nuevos cortes o desigualdades, Toth y Vigo [9] muestran con detalle cómo estas desigualdades se pueden aplicar al VRP. Estas desigualdades han mostrado tener bastante éxito en la resolución de problemas, pero lamentablemente dependen mucho de la estructura particular del VRP.
- Los algoritmos de tipo Partición de Conjuntos - Generación de Columnas se basan en el método de descomposición de Dantzig-Wolfe [10]. La idea clave consiste en enumerar todas las rutas factibles para todos los vehículos y resolver el problema de set covering asociado. Lamentablemente, como la cantidad factible de rutas es exponencial en el número de nodos es inviable computacionalmente resolver directamente este problema.
- En cuanto a los algoritmos aproximados dentro de los más comúnmente usados están los métodos de ahorro de tiempo que buscan mezclar rutas con un criterio de pegado entre ellas, dentro de estos trabajos destacan los de Clark y Wright [11].

También destacan los métodos de inserción en cambio los cuales parten con rutas inicialmente vacías (o que contienen un único nodo) e iterativamente evalúan la mejor forma de insertar un nodo en alguna ruta, y se quedan con el par (nodo, ruta) que representa la mejor inserción. Este método fue inicialmente usado para el problema de ruteamiento de vehículos por Mole y Jameson [12].

Dentro de los métodos metaheurísticos están Recocido Simulado, Recocido Determinístico, Búsqueda Tabú, Algoritmos Genéticos, etc. A diferencia de los

métodos heurísticos clásicos, en un método metaheurístico el algoritmo puede considerar pasar de una solución x_t a otra x_{t+1} cuyo costo sea mayor.

Los métodos de Recocido Simulado funcionan de la siguiente manera:

Durante la iteración t , se tiene una solución x_t de costo $c(x_t)$. Dentro de una vecindad $N(x_t)$.

Se elige aleatoriamente un miembro $x \in N(x_t)$ de costo $c(x)$. Si $c(x) < c(x_t)$, entonces se hace $x_{t+1} = x$. En caso contrario

$$x_{t+1} = \begin{cases} x, & \text{con probabilidad } p_t \\ x_t, & \text{con probabilidad } 1 - p_t \end{cases}$$

Donde p_t en general es una función decreciente en t a valores en $[0,1]$. En la forma que tenga p_t y el cómo se definen las vecindades $N(x_t)$ se encuentran los distintos métodos propuestos en la literatura, entre los cuales está los propuestos por Robusté, Daganzo y Souleyrette [13]; y Alfa, Heragu y Chen [14].

Cuando la aceptación de una nueva solución viene dada por un criterio determinístico se llama Recocido Determinístico.

Los métodos de tipo Búsqueda Tabú son similares a Recocido Simulado con la diferencia de que la movida se realiza al mejor vecino x de una solución x_t . Para evitar ciclos se prohíbe que una misma solución sea revisada más de una vez durante un cierto número de iteraciones.

Uno de los trabajos realizados con este método es el de Barbarosoglu y Ozgur [15].

4. POBLACIÓN AFECTADA

El municipio de La Virginia cuenta con 31.967 habitantes aproximadamente (este dato corresponde a proyección de población realizada por el DANE al 30 de junio 2014) [16]. El modo de transporte más utilizado dentro del municipio diferente a la movilización a pie, es la bicicleta la cual es usada para realizar aproximadamente 8713 viajes por día. A continuación, en la Tabla 2 se observa el número de viajes que se realiza a diario en La Virginia correspondiente a cada medio de transporte:

MEDIO DE TRANSPORTE	NÚMERO DE VIAJES POR DÍA
A pie	16234
Bicicleta	8713
Transporte público, colectivo y masivo	6646
Moto	3818
Especial empresa – colegio	2777
Vehículo particular	1049
Intermunicipal	687
Otro	325
Particular colectivo (pirata)	119
Moto Taxi	58
Taxi	9

Tabla 2. Modo de transportes en La Virginia. Fuente: Proyecto de grado CONSTRUCCIÓN MATRIZ OD TRANSPORTE AMCO (2010).

De la Tabla 2 se tiene que en La Virginia se realizaron 6646 viajes al día en transporte público, este dato es al 2010; teniendo en cuenta que la única ruta hábil para los virginianos es la ruta 27 estos viajes corresponden a dicha ruta.

Según estudio realizado por el AMCO en el 2013, la ruta 27 realizó 10625 viajes al día de los cuales 6500 corresponden a usuarios de La Virginia.

De acuerdo a lo anterior se evidencia que del 2010 al 2013 ha habido una leve disminución en el número de viajes por día en transporte público para los habitantes de La Virginia, lo cual puede deberse a que haya aumentado el uso de medios alternos a este o que haya disminuido el número de viajes a Pereira. Para determinar la tasa de variación de este dato se puede calcular la tasa de crecimiento anual compuesto (TCAC o también CAGR, *Compound annual growth rate*, en inglés), la cual representa la tasa de crecimiento año tras año de una inversión durante un periodo de tiempo especificado. Si bien este método es utilizado comúnmente en los negocios, también es útil usarlo para conocer el porcentaje de variación en el tiempo de la población.

Para realizar dichas proyecciones se utiliza la Ec. 1.

$$CAGR = \left(\frac{V_f}{V_i}\right)^{\frac{1}{t}} - 1 \quad (1)$$

Donde

V_f : Valor final

V_i : Valor inicial

t : número de periodos transcurridos

Ahora bien, para el dato de interés en el presente trabajo que es el número de viajes que son realizados en La Virginia a través del transporte público se procede a usar la Ec. 1 así:

V_f : 6.500 (Año 2013)

V_i : 6.646 (Año 2010)

t : 3

$$CAGR = \left(\frac{6.500}{6.646}\right)^{\frac{1}{3}} - 1 = -0,00737699 \quad (2)$$

De la Ec. 2 se tiene que la tasa de variación del número de viajes realizados en La Virginia a través del transporte público es 0,737699% que al tener un signo negativo indica que es de decrecimiento.

Para determinar el valor de este dato al 2014 se despeja V_f de la Ec. 34 así:

$$V_f = V_i(CAGR + 1)^t \quad (3)$$

Entonces para los siguientes datos se utiliza la Ec. 3 para hallar el V_f (2014):

$CAGR$: -0,00737699

V_i : 6.500 (Año 2013)

t : 1

$$V_f = 6.500(-0,00737699 + 1)^1 = 6.452,04959 \cong 6.452 \quad (4)$$

De acuerdo a la Ec.4 el número de viajes transportados por la ruta 27 al día correspondientes a usuarios de La Virginia es 6.452. Ahora bien, si se supone que una persona que usa el transporte público realiza mínimo dos viajes al día, (para este caso sería uno de ida a Pereira y otro de vuelta a La Virginia) se podría decir que son 3.226 los usuarios diarios de la ruta 27 originarios de La Virginia y por lo tanto serían 3.226 los habitantes de La Virginia afectados por los problemas que viene presentando la ruta los cuales se revisan en el siguiente capítulo.

5. DIAGNÓSTICO SOCIAL

La Virginia Risaralda es un municipio que pertenece al área metropolitana de centro occidente, localizado al occidente de la ciudad de Pereira aproximadamente a 30 km de esta. Cuenta con 30.095 habitantes según censo del 2005 [17] los cuales en su mayoría se emplean en Pereira [18] lo que hace que el transporte público que comunica a estos dos municipios cobre gran importancia. De los 10.000 viajes que transportó la Ruta 27 diariamente en el año 2012 [19] aproximadamente 6.646 [20] corresponden a La Virginia lo cual demuestra que hay una gran población afectada, la cual necesita soluciones prontas.

El Área metropolitana de centro occidente cuenta con un sistema integrado de transporte masivo llamado MEGABUS el cual fue puesto en marcha en el 2006. Actualmente La Virginia no es participe de este sistema lo cual perjudica enormemente a sus habitantes puesto que para movilizarse a algunos lugares del área metropolitana, como la Av. Sur, Dosquebradas, Av. Circunvalar, comunas que están alejadas a las vías por donde circula la ruta 27, etc., deben hacer transbordo dado que la ruta 27 no tiene dentro de su recorrido toda el área metropolitana, lo que les genera un doble costo del transporte, mientras que dentro del sistema integrado se puede hacer transbordo sin costo adicional. A continuación algunos casos que ejemplifican lo anteriormente dicho:

- En Dosquebradas se encuentra el SENA - Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial, en el cual muchos jóvenes de La Virginia se capacitan. Para llegar a este lugar deben tomar doble transporte ya que la Ruta 27 no transita por Dosquebradas, lo que genera un costo de transporte diario de \$6.800 (\$3.400 de ida y \$3.400 de vuelta).
- La única ruta de transporte público con la que cuenta La Virginia es la ruta 27 la cual tiene el siguiente recorrido:

La Virginia, (Calle 15- Cra. 9 A, Calle 12 – Cra. 5 - Transversal 6ta- Calle 7- Cra 8- Calle 8ª- Cra 9, Calle 5), Cerritos, Avda. 30 de Agosto, Turín, Cra 8, Calle 43, Cra 9 bis, Calle 41, Cra 9, Calle 37, Cra 10, Calle 26, Cra 11, Calle 18, Cra 15, Calle 17, Terminal de Transportes, U.T.P.

Vuelta

UTP, Álamos, Terminal de Transportes, Calle 17, Cra13, INVICO, Calle 13, Cra 4, Calle 28, Cra 6, Avda. Del Rio, Intersección de Turín, Avda 30 de Agosto, Cerritos, La Virginia (Calle 5- Cra 8- Calle 9- Cra 10- Calle 10- Cra5- Calle 12- Cra 9- Calle 15- hasta el parque pio doce subiendo por la Calle 15- hasta el control la Virginia) [21]

De esta manera, las personas que se dirigen a algún lugar ubicado sobre la avenida sur deben hacer uso de transporte intermunicipal el cual no cuenta con diversidad de horarios y altas frecuencias, o en su defecto usar la ruta 27 y luego abordar otra ruta que los lleve a su destino sobre la avenida sur. Dentro de las personas que necesitan movilizarse por la Av Sur están los estudiantes de universidades como la Católica, La Libre, la Autónoma de las Américas, etc. Actualmente las personas que van por la Av. Sur usan el transporte intermunicipal ofrecido por la empresa COOCHOFERES en La Virginia, donde deben pagar una tarifa de 2300, la cual es 26% más costosa que el pasaje del transporte público (\$1700), además los estudiantes de las universidades nombradas anteriormente no pueden hacer uso del subsidio de transporte ofrecido por la alcaldía de La Virginia a los estudiante (por medio de tiquetes), ya que este solo es válido para la Ruta 27.

Como los dos casos anteriores existen muchos más, donde las personas deben abordar dos buses (pagando doble pasaje) para llegar a su destino, lo que se vería solucionado al integrar la ruta 27, que comunica a los habitantes de La Virginia con Pereira, al MEGABUS, ya que este cuenta actualmente con 31 rutas alimentadoras, número que se va ir incrementando a medida que MEGABUS se expanda a los sectores que aún no cubre.

MEGABUS actualmente moviliza a 97 mil usuarios [22] con las 31 rutas alimentadoras que posee, además cuenta con 3 rutas articuladas, 2 intercambiadores (el primero ubicado en el sector y el segundo en Dosquebradas), y uno auxiliar (estación el viajero), el cual fue un intercambiador provisional mientras se construía el intercambiador de Cuba, de igual manera este sigue funcionando como intercambiador contando con 4 rutas alimentadoras.

A continuación el mapa de rutas y estaciones de MEGABUS que permite entender cómo opera este SITP:

Rutas y Estaciones de MEGABÚS

(MEGABUS Routes and Stations)



Figura 1. Rutas y estaciones de MEGABÚS. Fuente: Página Web de MEGABUS

Al observar la Fig. 1 se evidencian dos opciones de recorrido para la operación de la ruta 27. Cabe anotar que la determinación del trayecto es una de las decisiones más fundamentales para la operación adecuada de una ruta, dado que esta impacta directamente a los usuarios en cuanto al tiempo de transporte, tiempo de desplazamiento entre el destino final del usuario y el punto más cercano por donde la ruta pasa, número de transbordos a hacer, entre otros.

Para el caso particular de la ruta de La Virginia, existe una experiencia previa que si bien la ruta no estaba articulada al SITP Megabus, esta ha operado siempre por el trayecto de la Av. 30 de Agosto, dado que la misma demanda ha llevado a que

se siga este trayecto por la necesidad que tienen la mayoría de los usuarios de desplazarse a zonas cercanas al centro de Pereira.

Ahora bien, dado que en un futuro se espera la integración de la ruta 27 al Megabus es importante considerar los dos trayectos viables entre La Virginia y Pereira con el fin de determinar los pros y los contras de cada uno.

La primera opción de trayecto es la ya nombrada, que cruza la Av 30 de Agosto:

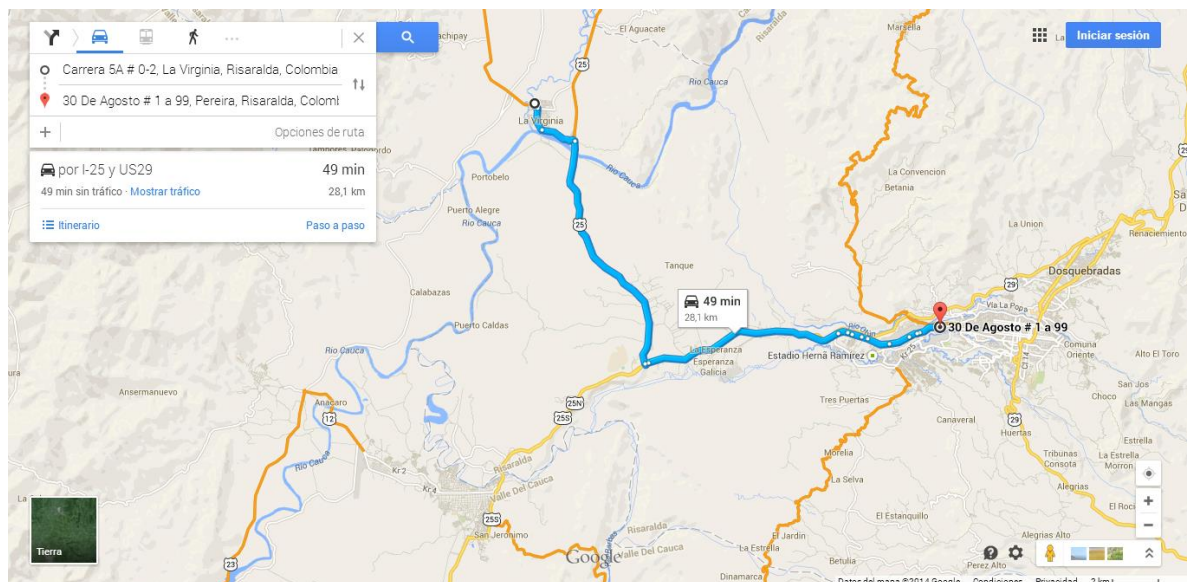


Figura 2: Trayecto La Virginia –Pereira cruzando la Av. 30 de Agosto. Fuente: Google Maps.

En la Fig. 2 se observa el trayecto desde el parqueadero de buses en La Virginia que se encuentra en la carrera 5 hasta la estación “El viajero”, la distancia entre estos dos puntos es de aproximadamente 28,1 km. Ahora bien en cuanto a la conveniencia para los usuarios de que esta estación sea el punto de llegada de la ruta se deben considerar las rutas con las que puede hacer transbordo y los destinos que más predominan en los usuarios; para esta última consideración se recomienda realizar una encuesta origen destino como la que se encuentra al final del presente trabajo, además de tener en cuenta la experiencia previa de la operación de la ruta 27 la cual muestra que siempre ha existido una gran demanda por el trayecto de la Av. 30 de Agosto.

Ahora bien, los alimentadores que hacen conexión con “El viajero” son:

- Belmonte
- Galicia

- Cerritos
- Estadio 2
- Puerto Caldas
- Aeropuerto

Adicional a esto, también hacen conexión los tres articulados del Megabus que son:

- Ruta 1: Dosquebradas – Cuba, Cuba – Dosquebradas
- Ruta 2: Dosquebradas – Centro - Cuba, Cuba – Centro - Dosquebradas
- Ruta 3: Centro – Cuba, Cuba - Centro.

La segunda opción de trayecto se refiere a la que contiene a la Av. Sur.

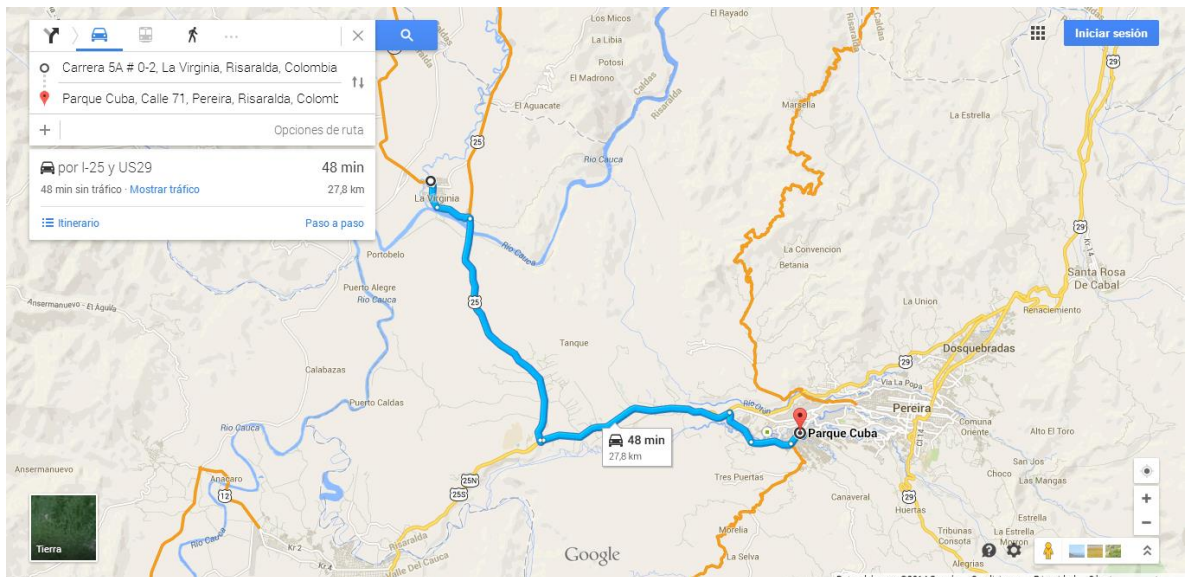


Figura 3: Trayecto La Virginia – Pereira cruzando la Av. Sur. Fuente: Google Maps.

El trayecto de la Fig. 3 al igual que el anterior tiene como origen el parqueadero de los buses en La Virginia, y como destino el intercambiador de cuba que se encuentra ubicado en el parque Cuba – Calle 71. La distancia aproximada entre estos dos puntos es de 27,8 km.

Los intercambiadores que tienen conexión con esta estación son:

- Altagracia
- Guayacanes
- Morelia
- Mercasa
- Perla del sur

- San Joaquín
- 2500 lotes
- Terranova
- El dorado
- Villa Ligia
- Naranjillo
- Estadio
- Montelibano
- Miraflores
- San Fernando
- Altavista

Adicional a esto, también hacen conexión los tres articulados del Megabus que son:

- Ruta 1: Dosquebradas – Cuba, Cuba – Dosquebradas
- Ruta 2: Dosquebradas – Centro - Cuba, Cuba – Centro - Dosquebradas
- Ruta 3: Centro – Cuba, Cuba - Centro.

Después de hacer esta breve revisión de los dos posibles trayectos que puede hacer la ruta 27, se identifica que tanto la estación “El viajero” como el intercambiador de Cuba tienen conexión con los tres articulados del Megabus, lo que garantiza que el usuario tiene acceso de servicio que cubre toda el área del centro, de Cuba y de Dosquebradas. Adicional a esto se observa que al ser el punto de conexión en Cuba un intercambiador este cuenta con un número de rutas alimentadoras mayor al de la estación “El viajero” lo que pone a este último en desventaja; sin embargo teniendo en cuenta lo dicho anteriormente sobre la predominancia del sector del centro como punto de destino de los usuarios sería posible que actuando a favor de la mayoría sea más viable el trayecto con conexión a la estación “El viajero” puesto que permite un trayecto más directo para los usuarios en cuanto a distancia.

6. DEFINICIÓN DE PROBLEMAS

Un gran número de los problemas que se presentan en el servicio de transporte pueden ser abordados desde la optimización, permitiendo encontrar soluciones de muy buena calidad.

Con base en la Tabla 1. Requerimientos de un sistema de transporte, es posible detectar dichos problemas comprendiendo las necesidades de los actores del sistema de transporte público. Así pues, se presenta a continuación la definición de los problemas más importantes en la literatura que a la planificación del transporte se refiere y que aplican al caso de estudio.

6.1. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Esta etapa es de suma importancia en la etapa inicial de la planificación puesto que a partir de la información recopilada se abordan y se solucionan los demás problemas. Elegir el método apropiado y contar con los recursos necesarios hacen posible obtener la información necesaria de acuerdo a la necesidad que se tenga.

Existen diferentes métodos de recolección de información los cuales responden a diferentes necesidades y condiciones mismas de la ruta. Por ejemplo, para rutas que tengan tiempo de recorrido mayor a 40 minutos será más práctico que se use el método *Ride Check* verificación de viajes a bordo, puesto que se podrán hacer las respectivas observaciones y toma de datos en diferentes puntos clave de la ruta, por otro lado, si lo que se necesita es conocer información acerca de propósitos de viajes y origen destino de los mismos el *Passenger Survey* encuesta de pasajeros permite acceder a este tipo de información.

A continuación se exponen brevemente algunas técnicas de recolección de información de la demanda [23] que permiten recopilar una variedad de información.

MÉTODO	DESCRIPCIÓN
<i>RIDE CHECK</i> (Verificación de viajes a bordo)	Este método consiste en que se realicen conteos y mediciones a bordo del transporte ya sea por una persona o por un dispositivo automático. Este permite obtener información carga de pasajeros en cada tramo, número de personas que abordan en cada parada. Cabe resaltar que la tarea hecha por una persona puede generar información más detallada como origen-destino de cada pasajero.
<i>POINT CHECK</i> (Verificación de viajes en aforo)	Este se refiere a mediciones y conteos que hace generalmente una persona ubicada en una parada. La parada que se selecciona es donde se tenga la máxima carga a bordo, por lo tanto se debe inicialmente dividir el recorrido en segmento y luego identificar cual es el tramo en el que se transporta en el vehículo mayor número de personas. Si se tienen recorridos extensos se puede considerar más de un <i>Point Check</i> .
<i>DEADHEAD CHECK</i> (Verificación de viajes en punto de transbordo)	A partir de este método se mide el tiempo promedio entre un punto de llegada de una ruta y un punto de partida de otra ruta. Este método es muy útil para sistemas de transporte integrados, donde se debe buscar la sincronización cuando hay transbordo. La medición puede ser realizada por el mismo conductor del autobús.
<i>PASSENGER SURVEY</i> (Encuesta de pasajeros)	Este método se refiere a encuestas que se les realizan a los pasajeros directamente. Las encuestas pueden practicarse a bordo del autobús o en los paraderos, y pueden ir orientadas a una información específica o general, esto depende de la necesidad de la empresa transportadora. Para incrementar el porcentaje de respuesta se puede ofrecer algún obsequio.
<i>POPULATION SURVEY</i> (Encuesta a la población)	Este tipo de encuestas está orientado a la población en general, su principal propósito es medir la percepción que tienen del sistema de transporte tanto de las personas que hacen uso del servicio como de los que no. Estas encuestas se pueden realizar en puntos con alta concurrencia.

Tabla 3. Técnicas de recolección de información de la demanda.

Fuente: Elaboración propia basada en el libro Public Transit Planning and Operation.

Las técnicas de recolección de la Tabla 3 permiten obtener tanto información puntual como general para la planificación del transporte público.

6.2. PROBLEMA DE DETERMINACIÓN DE FRECUENCIA DE SALIDA

La determinación de la frecuencia de salida para la planeación de una ruta de transporte es un asunto sumamente importante puesto que esta se convierte en un insumo para resolver los demás problemas de planificación, además de que es un factor determinantes para la operación óptima de una ruta de transporte.

Es importante aclarar la importancia del cálculo de la frecuencia en diferentes franjas horarios, es decir, diferenciando horas valle y horas pico, ya que al calcularse una sola frecuencia esta debe ajustarse a la máxima demanda la cual se presenta en las horas pico, pero al operarse la ruta con esta misma frecuencia en horas valle se generan recorridos ociosos generando pérdidas económicas, contaminación y congestión innecesaria en la malla vial de la ciudad. Cabe anotar que si es necesario se debe diferenciar la frecuencia por días en el caso de esta varíe significativamente.

Existen diferentes métodos de determinación de la frecuencia los cuales responden al tipo de información que se tiene. En este trabajo se hará una breve revisión del método que permite considerar los cambios de demanda.

Cabe resaltar que el resultado de cualquier método es una aproximación la cual debe ser ajustado si existe experiencia previa; en el caso de que no exista debe ser puesta a prueba para determinar si la frecuencia es la apropiada. Además de lo anterior, es importante que se tenga en cuenta el factor costo para que haya un equilibrio entre el beneficio a la empresa transportadora y a los usuarios, ya que de acuerdo a la frecuencia se necesita determinada flota de vehículos que la pueda suplir.

6.2.1. Método de carga máxima: este método como su nombre lo indica basa la frecuencia de salida en la carga máxima registrada en cada franja horaria, es decir, la frecuencia es determinada diferenciando las diferentes horas del día y se considera el máximo número de pasajeros por periodo de tiempo. La ecuación que representa este método es muy sencilla y solo intervienen 3 variables:

P_j : Promedio máximo número de pasajeros observados en el periodo j .

c : Número de asientos disponibles en el autobús

y_j : Factor de carga, es decir, el porcentaje de 1 a 100 de carga del vehículo que se desea.

$$F_j = \frac{P_j}{y_j * c} \quad (5)$$

La Ec. 5 permite encontrar el valor de la frecuencia más apropiada al periodo j , considerando que para cada periodo la demanda es variables.

Para determinar el P , es recomendable usar la técnica de recolección de información point check, ya que esta permite obtener datos acerca del número máximo de pasajeros por tramo y por periodo.

A continuación, en la Fig. 4, se puede observar los datos de entrada necesarios para usar este método de determinación de frecuencia y los datos de salida que arroja dicho método. Siendo el número de pasajeros el dato que debe ser recolectado a través de trabajo de campo, mientras que los otros dos ya están dados por el operador.



Figura 4: Entradas y salidas del método de carga máxima. Fuente: elaboración propia.

6.2.2. Modelo de Ceder y Wilson [24]: en este modelo los autores introducen las frecuencias como variables de decisión, lo que permite calcular: los tiempos de espera y el tamaño de flota necesario para cubrir los servicios considerando los objetivos de los operadores. Las variables a considerar en el modelo son:

a_1 y a_2 : Coeficientes de conversión.

d_{ij} : Demanda entre los nodos i y j .

t_k : Tiempo de recorrido de la ruta k .

tv_{ij} : Tiempo de viaje entre los nodos i y j .

r_k : es un valor que indica una máxima cantidad de recorridos en la solución R .

t_{min} y t_{max} : son duraciones de recorridos mínima y máxima respectivamente.

α_{ij} : es el desvío máximo permitido para el tiempo de viaje en vehículo, de los pasajeros que viajan de i a j en la solución R , con respecto al tiempo de camino más corto entre i y j en la red.

f_k : Frecuencia de la ruta k .

te_{ij} : Tiempo de espera.

W_{max} : Máximo valor establecido para tamaño de flota.

$$\min\{a_1(\sum_{i,j \in [1..n]} d_{ij} (tv_{ij} - t_{ij}^*) + \sum_{i,j \in [1..n]} tt_{ij} + \sum_{i,j \in [1..n]} te_{ij}) + a_2 \sum_{r_k \in R} f_k t_k\} \quad (6)$$

s.a.

$$\frac{tv_{ij}}{t_{ij}^*} \leq 1 + \alpha_{ij} \quad \forall r_k \in R \quad (7)$$

$$t_{min} \leq t_k \leq t_{max} \quad \forall r_k \in R \quad (8)$$

$$|R| \leq r_{max} \quad (9)$$

$$f_k \geq f_{min} \quad \forall r_k \in R \quad (10)$$

$$\sum_{r_k \in R} f_k t_k \leq W_{max} \quad (11)$$

$$R \subseteq \Omega$$

$$f_k \in R^+$$

La Ec. 6 corresponde a la función objetivo la cual busca minimizar los tiempos de viaje, la frecuencia de operación, y el tamaño de flota. La Ec. 7 establece la restricción sobre el desvío máximo permitido para el tiempo de viaje en vehículo de los pasajeros que viajan de i a j . La Ec. 8 indica las cotas del tiempo de recorrido de la ruta k . La Ec. 9 restringe el número de recorridos. La Ec. 10 garantiza que la frecuencia que arroje la solución sea mayor que la mínima permitida. La Ec. 11 establece la cota máxima del tamaño de la flota.

6.2.3. Metaheurística GRASP como técnica de solución al problema de determinación de frecuencias [25]: GRASP es una metaheurística diseñada para resolver problemas de optimización combinatoria que consiste en la ejecución repetida de un procedimiento de construcción de soluciones, seguida de una búsqueda local. La construcción se realiza en forma ávida, agregando iterativamente a una solución, elementos que se seleccionan en forma aleatoria de una lista de candidatos. La búsqueda local requiere la definición de una estructura de vecindad, a través de la cual se avanza sucesivamente en la dirección de mejora de la función objetivo. Esta metaheurística ha sido aplicada a problemas multiobjetivos en los que no solo se busca determinar el valor de la frecuencia óptima de operación sino también la estructura de los recorridos.

La fase de construcción de soluciones determina la estructura de los recorridos, estas soluciones van acompañadas las frecuencias mínimas factibles que no supere por debajo a la frecuencia mínima permitida. El procedimiento de construcción de soluciones genera recorridos en forma iterativa, buscando satisfacer la demanda de cada par de vértices, cabe anotar que estas soluciones deben considerar la duración máxima del recorrido. La fase de búsqueda local opera sobre el conjunto de frecuencias determinado. La vecindad de una solución se define variando las frecuencias, esto es, evaluando los costos de aumentar o disminuir las frecuencias en todo recorrido de la solución S .

6.3. PROBLEMA DE DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE FLOTA

Este problema consiste en determinar el número de vehículos necesarios para para operar eficientemente y poder cumplir efectivamente con la frecuencia determinada. Para calcular esto existen tanto métodos exactos como aproximados, estos últimos

no garantizan la respuesta óptima pero permiten tener en cuenta más variables y modelar mejor la realidad.

6.3.1. Fórmula de determinación del tamaño de flota:

A partir de la Ec. 12 es posible determinar el tamaño de flota necesario para la operación de una ruta simplemente teniendo en cuenta el tiempo de ciclo y el intervalo de tiempo que existe entre las salidas de los buses. Cabe anotar que este método no considera estos intervalos de tiempo variables, por lo que para una ruta con frecuencia variable este método no sería efectivo.

$T_c = 2(T_r + T_t)$: Tiempo de ciclo, es decir el tiempo en realizar un viaje total redondo, volviendo a pasar por un mismo punto.

T_r : es el tiempo de recorrido.

T_t : Tiempo adicional por esperas en terminales u otro tipo de paradas.

i : es el intervalo de frecuencia, es decir, el tiempo que hay entre la salida de dos buses.

$$N = \frac{T_c}{i}, \quad (12)$$

Cuando se desea tener en cuenta otros factores para la determinación de la flota es necesario hacer uso del modelamiento matemático. Los factores más importantes a tener en cuenta son la frecuencia, el factor de carga y el tiempo de transbordo.

A continuación se presenta una breve revisión de algunos modelos que han sido planteados:

6.3.2. Modelo de Baaj y Mahmassani [26]:

Estos autores buscan minimizar el tamaño de la flota considerando la frecuencia ya determinada, y el factor de carga. A continuación las variables involucradas en el modelo:

n : Cantidad de nodos en la red;

d_{ij} : Demanda (cantidad de viajes por unidad de tiempo) entre los nodos i y j ;

t_{ij} : Tiempo total de viaje entre i y j (en vehículo, espera y transferencia, si existe);

N_k : Cantidad de buses operando en la ruta k , $N_k = f_k T_k$;

f_k : Frecuencia de buses operando en la ruta k ;

F_{min} : Mínima frecuencia de buses permitida para toda ruta;

T_k : Tiempo total de viaje de la ruta k ;

W : Tamaño de la flota disponible (cantidad de buses por hora);

LF_k : Factor de carga en la ruta k ;

$(Q_k)_{max}$: Máximo flujo por arco en la ruta k ;

CAP : Capacidad de pasajeros sentados en los buses;

LF_{max} : Máximo factor de carga permitido;

R : Conjunto de rutas para una solución dada;

C_1 y C_2 : Factores de conversión y pesos relativos de los términos de la función objetivo.

$$\min\{C_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} t_{ij} + C_2 \sum_{k \in R} f_k T_k\} \quad (13)$$

s.a

$$f_k \geq f_{min} \quad \forall k \in R \quad (14)$$

$$LF_k = \frac{(Q_k)_{max}}{f_k CAP} \leq LF_{max} \quad \forall k \in R \quad (15)$$

$$\sum_{k \in R} N_k = \sum_{k \in R} f_k t_k \leq W \quad (16)$$

La Ec. 13 busca garantizar que la frecuencia que se tome en la ruta sea mayor o igual a la frecuencia mínima permitida. La Ec. 14 corresponde a la restricción de factor de carga del vehículo. La Ec. 15 busca que el número de buses que vayan a operar en la ruta k no supere el número de vehículos disponibles. La Ec. 16 restringe el tamaño de la flota a un valor máximo.

Este modelo tiene la ventaja de considerar factores de los que ya se tiene conocimiento para así tener un resultado que tenga alta relación con la realidad.

6.3.3. Modelo propuesto por Israeli y Ceder [27]:

La característica principal de este modelo es que tiene es que su formulación es multiobjetivo, el cual busca minimizar no solo el tamaño de la flota, sino también los tiempos de espera de los pasajeros, tiempos de viaje vacío, y el tiempo de viaje de los pasajeros.

PH_{ij} : Cantidad de pasajeros/hora, entre los nodos i y j (mide el tiempo de viaje en vehículo de los pasajeros);

WH_{ij} : Tiempo de espera de pasajeros entre los nodos i y j ;

EH_r : Tiempo de viaje vacío, que refleja la utilización de los buses;

FS : Tamaño de la flota;

R : Conjunto de rutas para una solución dada;

a_1 , a_2 y a_3 : Pesos que reflejan la importancia relativa de los términos de la función Z_1 .

$$\min Z_1 = a_1 \sum_{i,j \in N} PH_{ij} + a_2 \sum_{i,j \in N} WH_{ij} + a_3 \sum_{i,j \in N} EH_r \quad (17)$$

$$\min Z_2 = FS \quad (18)$$

La Ec.17 busca minimizar los tiempos de operación de la ruta dividiéndola en tramos. La Ec.18 minimiza el tamaño de la flota. Cabe resaltar que ambas ecuaciones son dependientes una de la otra.

6.3.4. Modelo propuesto por Ngamchai y Lovell [28]:

Este modelo permite minimizar el costo de operación de la ruta teniendo en cuenta la frecuencia de salida y el costo de espera de los usuarios. Cabe resaltar que el

modelo requiere de coeficientes de conversión para que toda la ecuación quede en unidades de \$/hora.

R : Cantidad de rutas de una solución determinada;

CV Costo por hora de operación de los buses;

V Velocidad de los buses en la red;

d_k : Largo de la ruta k ;

q_{ij} : demanda entre los nodos i y j (cantidad de viajes por hora);

D_{ij} : Largo de la ruta más corta seleccionada por los pasajeros viajando de i a j ;

α_{ijk} : $\alpha_{ijk} = 1$ si la ruta k utiliza el arco (i, j) , $\alpha_{ijk} = 0$ en caso contrario;

γ_v y γ_w : coeficientes que reflejan el valor subjetivo de los tiempos de viaje y espera;

h_k : Espaciamiento temporal del servicio operante en la ruta k (inverso de la frecuencia),

$$\min\{FC + UVC + UWC\} \quad (19)$$

$$FC = \frac{2c_v}{v} * \sum_{k=1}^R \frac{d_k}{h_k} \quad (20)$$

$$UVC = \frac{\gamma_v}{v} * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} D_{ij} \quad (21)$$

$$UWC = \frac{\gamma_w}{2} * \sum_{k=1}^R \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} \alpha_{ijk} h_k \quad (22)$$

La Ec. 19 representa la función objetivo la cual se divide en tres componentes. La Ec. 20 corresponde al costo de la flota. La Ec. 21 hace referencia al costo de viaje en vehículo que deben asumir los usuarios. La Ec. 22 representa el costo de espera de los usuarios.

A continuación la Fig. 5 indica los datos de entrada y salida básicos para el modelo de determinación de tamaño de flota. Cabe anotar que dentro de los datos de entrada se encuentra la frecuencia el cual es el dato arrojado por los modelos revisados en la sección 3.2., además se observa que al igual que para hallar la frecuencia, para determinar el tamaño de flota es necesario el dato de la demanda.

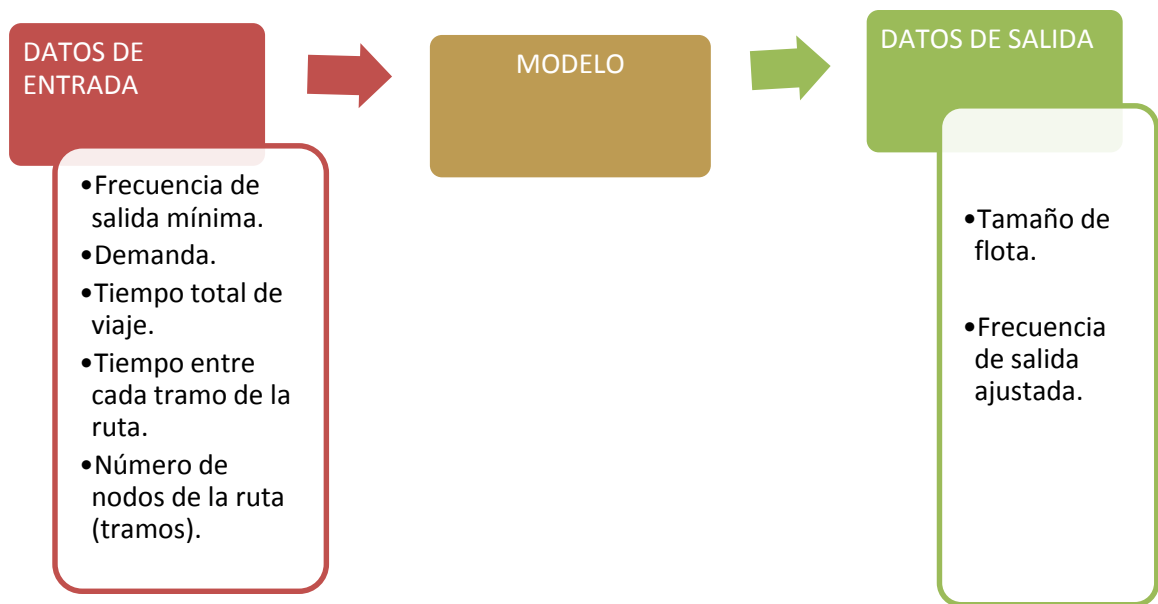


Figura 5: Entradas y salidas para determinación del tamaño de flota. Fuente: elaboración propia.

6.3.5. Algoritmo de generación de rutas para determinación de tamaño de flota [29]: Este enfoque se basa en el modelo y algoritmo genético de Baaj y Mahmassani (1991). Inicialmente se aplica un procedimiento de identificación de corredores, el cual implica el cálculo de caminos más cortos entre todo par de nodos de la red, asignación de demanda a rutas y chequeo de restricciones de mínimo y máximo flujo de pasajeros en arcos. Este procedimiento identifica el subconjunto de nodos que participará en el procedimiento de generación de rutas. En la generación de soluciones iniciales considerando la matriz origen-destino como guía principal, se considera un único objetivo, el de minimizar los tiempos de viaje de los pasajeros. Se generan k caminos entre cada par de nodos de alto flujo (k dado por el usuario) y se utilizan algoritmos genéticos para seleccionar uno de los k entre todo par de nodos.

El procedimiento de evaluación (principalmente el de asignación) asigna los flujos de pasajeros en cada arco de la red, y determina las frecuencias válidas que cumplen con el valor del factor de carga establecido. Este procedimiento se repite hasta lograr convergencia (diferencia aceptada entre frecuencias de entrada y salida del algoritmo). En una segunda fase se determinan las frecuencias óptimas

para la solución hallada en la fase anterior. Nuevamente se utilizan algoritmos genéticos, donde ahora la función objetivo incorpora los objetivos del operador, en la forma de costo de flota, y los tiempos de espera en los costos del usuario. El principal parámetro que controla este proceso es el factor de carga de los buses.

6.4 PROBLEMA DE DETERMINACIÓN DE HORARIOS (SCHEDULING) DE OPERACIÓN CON SINCRONIZACIÓN EN UN SISTEMA DE TRANSPORTE

Los horarios de operación de la ruta es uno de los componentes más importantes de la planificación del transporte y el diseño de una ruta en un sistema de transporte integrado ya que los horarios deben ir sujetos a los que corresponden a las rutas del sistema que con las que compartan puntos de transferencia con el fin de que exista una sincronización de las mismas. El principal objetivo de la creación de horarios es tener un servicio puntual.

La sincronización entre las rutas va a ser menos exacta dependiendo del tamaño del sistema, no obstante es posible que los tiempos de espera en el transbordo sean mínimos.

La programación de rodamientos o itinerarios para los vehículos es un proceso que partiendo de las frecuencias de despacho para una determinada ruta a lo largo del día, determina los recorridos necesarios para prestar el servicio y asigna los vehículos que deben efectuar cada uno de esos recorridos.

El objetivo es ofrecer un servicio ajustado a la demanda, pero organizando los despachos de cada vehículo de tal forma que se minimicen tiempos de espera en terminal.

A continuación algunos de los modelos clásicos sobre determinación de horarios, incluyendo la sincronización con el sistema.

6.4.1. Modelo propuesto por Ceder, Golany y Tal (2001) [30]:

Este modelo es la continuación de uno que había propuesto Ceder en 1986 en el que estudió el problema de creación de horarios para rutas de transporte, la diferencia es que el autor considera en el modelo la sincronización como un factor a maximizar paralelo a la creación de los horarios.

En el artículo de 1986 Ceder [31] establece tres pasos básicos para la construcción de un modelo que permita determinar horarios óptimos de operación de una ruta:

1. Determinar el tipo de avance.

2. Seleccionar el método para ajustar las frecuencias.
3. Seleccionar los factores a considerar en la función objetivo como por ejemplo minimizar tiempo de viaje, minimizar costos de operación, etc.

La formulación del modelo es la siguiente:

La red de las rutas está representada por grafos dirigidos $G = \{AN\}$, donde A es el conjunto de arcos que representan los caminos de las rutas y N es el conjunto de nodos de transferencia en la red.

M : el número de rutas en la red.

$Hmin_k$: Avance mínimo requerida en la ruta k .

$Hmax_k$: Avance máximo requerida en la ruta k .

$[0, T]$: es intervalo de tiempo de servicio de transporte.

F_k : Número de salidas que van a ser programadas en el intervalo $[0, T]$.

T_{kj} : Es el tiempo de viaje desde el punto de salida al nodo j .

X_{ik} : Representa el tiempo de salida del bus i en la ruta k .

Z_{ikjqn} : Es una variable binaria que toma el valor de 1 si el bus i en la ruta k tiene conexión con el bus j de la ruta q en el nodo n , de lo contrario el valor es cero.

$$Max \sum_{k=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{F_k} \sum_{q=k+1}^M \sum_{j=1}^{F_q} Z_{ikjqn} \quad (23)$$

$$X_{ik} \leq Hmax_k, \quad 1 \leq k \leq M \quad (24)$$

$$X_{F_k K} \leq T, \quad 1 \leq k \leq M \quad (25)$$

$$Hmin_k \leq X_{(i+1)k} - X_{ik} \leq Hmax_k, \quad 1 \leq k \leq M, \quad 1 \leq i \leq F_k - 1 \quad (26)$$

$$Z_{ikjqn} = \max[1 - |(X_{ik} + T_{kn}) - (X_{jq} + T_{qn})|, 0] \quad (27)$$

La Ec. 23 corresponde a la función objetivo la cual busca que se maximice la sincronización de rutas en los horarios a determinar. La Ec. 24 asegura que el primer tiempo de salida no esté fuera de la frecuencia máxima desde el punto de inicio. La

Ec. 25 asegura que la última salida esté dentro del intervalo $[0, T]$. La Ec. 26 indica la frecuencia máxima. La Ec. 27 define la variable binaria de la función objetivo.

Este modelo permite realizar una programación factible y apropiada, para una ruta que va a ser introducida en una red de transporte público integrado.

La Fig. 6 indica los datos necesarios del modelo para determinar el dato de salida que es el horario de operación de cada una de las rutas. Se observa que dentro de los datos de entrada para los modelos correspondientes a la determinación de horarios de salida, se encuentra la frecuencia de salida y número de buses a operar en la ruta k (tamaño de flota), los cuales son los datos de salida de los modelos correspondientes a las secciones 3.2. y 3.3.

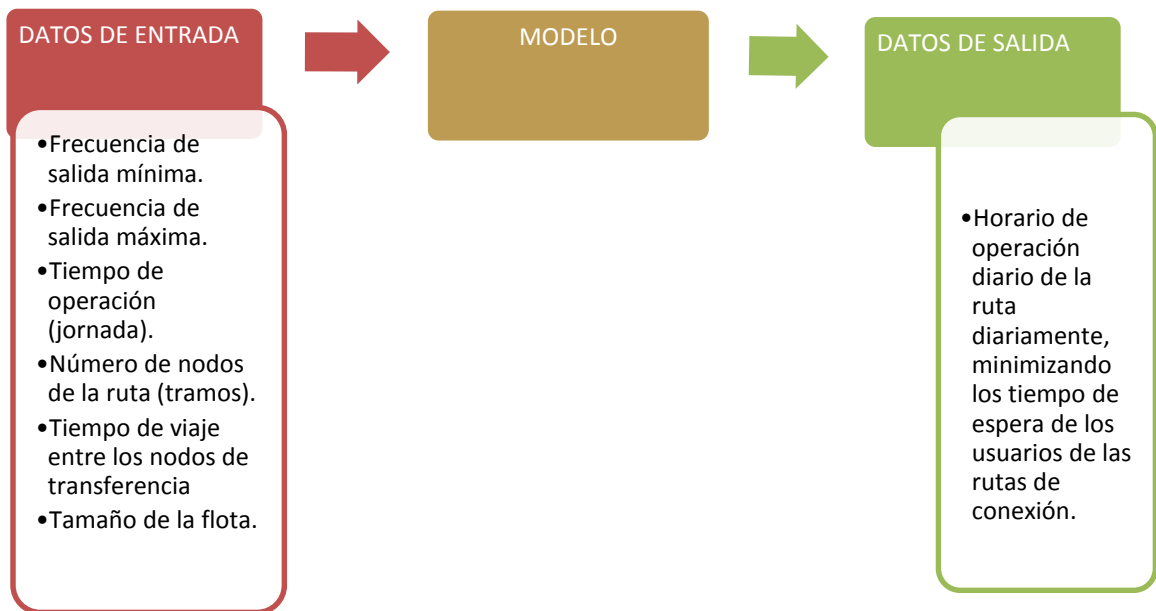


Figura 6. Entradas y salidas para modelo de determinación de horarios. Fuente: elaboración propia.

6.4.2. Modelo de optimización de frecuencias en BRT [32]: este modelo se concentra en la programación de salidas de las rutas en un periodo determinado, así pues, este modelo debe ser aplicado a cada una de las franjas horarias que se hayan determinado después de hacer un estudio de demanda ya que el modelo supone que en el periodo de estudio la frecuencia de salida es uniforme así como la tasa de llegada de pasajeros.

Las variables fundamentales del modelo son:

$d_{i,j}$: Hora de partida del vehículo i de la estación j .

$a_{i,j}$: Hora de llegada del vehículo i en la estación j .

$h_{i,j}$: Tiempo de diferencia entre el vehículo $i - 1$ y el vehículo i en la estación j .

t_j : Tiempo de recorrido entre la estación $j - 1$ y j .

h : Valor de avance entre vehículos (este valor es el inverso de la frecuencia y está expresado en minutos)

T_0 : Tiempo de permanencia en la estación.

c : Tiempo de aceleración y desaceleración.

$r_{j,k}$: Tasa de llegada de pasajeros desde la estación j a la estación k .

r_j : Tasa de llegada de pasajeros a la estación j .

$A_{i,j}$: Número de pasajeros que bajan del vehículo i en la estación j .

$B_{i,j}$: Número de pasajeros que abordan el vehículo i en la estación j .

$L_{i,j}$: Número de pasajeros sobre el vehículo i cuando este parte de la estación j .

$W_{i,jk}$: Número de pasajeros desde la estación j a las k en el vehículo i .

$s_{i,jk}$: Número de pasajeros en la estación k cuando el vehículo i parte de la estación j .

$\delta_{i,j}^l$: Variable binaria. Cuando el vehículo i para en j toma el valor de 1 de lo contrario es 0.

$\delta_{i,jk}^l$: Variable binaria. Cuando el vehículo i para en j y k toma el valor de 1 de lo contrario es 0.

C_1 : Costo de esperar pasajeros (\$/min).

C_1 : Costo de pasajeros a bordo (\$/min).

C_1 : Costo de operación del vehículo (\$/min).

T : Periodo estudiado.

$$\min(z) = C_1 \sum_{i=1}^{l_s} \sum_{j=1}^N \left(\frac{r_j h_{i,j}^2}{2} + S_{i-1,j} h_{i,j} \right) + C_2 \sum_{i=1}^{l_s} \sum_{j=1}^N [L_{i,j} (t_j + (\delta_{i,j}^l + \delta_{i,j-1}^l) c) + (L_{i,j} - A_{i,j}) \delta_{i,j}^l T_0] + C_3 \sum_{i=1}^{l_s} \sum_{j=1}^N [t_j + (\delta_{i,j}^l + \delta_{i,j-1}^l) c + \delta_{i,j}^l T_0] \quad (28)$$

s.a

$$L_{i,j} = L_{i,j-1} + B_{ij} - A_{ij} \quad (29)$$

$$a_{ij} = d_{i,j-1} + t_j + (\delta_{i,j-1} + \delta_{i,j}) c \quad (30)$$

$$h_{min} \leq h \leq h_{max} \quad (31)$$

La Ec. 28 corresponde a la función objetivo la cual busca minimizar 3 costos: el costo de espera de pasajeros, costos de pasajeros a bordo y costo de operación. La Ec. 29 corresponde a la restricción de pasajeros la cual representa que el número de pasajeros a bordo del vehículo i en la estación j debe ser igual al número de pasajeros a bordo del vehículo i en la estación $j-1$ más el número de pasajeros que abordaron el vehículo i en la estación j menos el número de pasajeros que se bajaron del vehículo en la estación j . La Ec. 30 hace referencia a la restricción de tiempo, la cual manifiesta que la hora de llegada del vehículo i a la estación j debe ser equivalente al tiempo de salida del vehículo i de la estación $j-1$ más el tiempo de recorrido entre $j-1$ y j más el tiempo de permanencia. Por último la Ec. 31 acota el tiempo de avance entre buses de acuerdo al nivel de servicio y la capacidad de los carriles.

6.4.3. Algoritmo para determinación de horarios de operación considerando la sincronización (SITP) [33]: El algoritmo se basa en la selección de nodos. Hay tres estados posibles para un nodo. Un nodo puede ser "nuevo", "posible" o "no posible

- Un nodo es "nuevo" si ninguno de los horarios de salida de rutas que pasan por el nodo está fijado.

- Un nodo se define como "posible" si:

Hay al menos una ruta que pasa a través de él y no se han fijado todos los horarios de salida para esa ruta.

Existe la posibilidad de crear más sincronización en el nodo.

- Un nodo es 'no es posible' si se han fijado todas las salidas de las rutas que pasan a través de él y no hay más llegadas simultaneas posibles.

En cada paso del algoritmo iterativo, un nodo se selecciona de entre todos los 'nuevos' y 'posibles' nodos. Hay tres pasos para la selección de un nodo. Ellos son:

1. Entre los 'nuevos' y 'posibles' nodos encontrar el nodo que tiene el número máximo de tiempos de llegada ya fijados. Si no hay tiempos de llegada se establecen o si existen vínculos vaya al paso 2. Si se identifica sólo un 'nuevo' o 'posible' nodo, etiquetar este nodo como 'SELECCIONADO'.
2. Identificar el nodo con el número máximo de rutas que pasan a través de él. Si existen vínculos vaya al paso 3. Si se identifica un solo nodo, etiquetar este nodo como 'SELECCIONADO'.
3. Calcular el tiempo máximo de viaje desde el origen de cada ruta a estos nodos. Seleccione el nodo con el valor mínimo y etiquetarlo como nodo 'SELECCIONADO'. Si existe un empate romper arbitrariamente.

Este procedimiento asigna horarios de salida para las rutas al encuentro en el 'nodo seleccionado' si es 'nueva'. Supongamos que dos rutas se reúnen en el nodo, entonces este procedimiento asigna la hora de salida de la ruta que lleva tiempo máximo para llegar a ese nodo. Asigna una hora de salida de 0 (es decir, la hora de inicio del horizonte de planificación) para el primer autobus en esta ruta que lleva tiempo máximo de viaje. Por la otra ruta asigna la hora de salida de modo que los tiempos de llegada de estas dos rutas en el nodo seleccionado se encuentra dentro de los límites de tiempo de espera especificado.

Este método establece los horarios de salida cuando el nodo seleccionado es "posible". Para un nodo 'posible' seleccionado habrá algunas rutas cuyos tiempos de partida ya se establecen utilizando el anterior procedimiento. Por lo tanto, los horarios de salida de las rutas que no estén establecidos son asignados para tener una llegada simultánea con las llegadas establecidas en el nodo. Si no hay más asignaciones posibles el nodo está marcado como 'no es posible'.

Este procedimiento comprueba si hay alguna salida no asignada que no se creó en los dos primeros procedimientos. De esta manera se garantiza un horario completo de salidas con un número óptimo de sincronizaciones en los nodos.

6.5. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE TURNOS A CONDUCTORES

El problema a plantear consiste en la construcción de un calendario para los conductores, planeado en una longitud de tiempo, que en este caso es de 7 días, que permita cubrir los turnos programados a partir de las frecuencias y horarios de salida (modelos de los que se hablaron anteriormente) para el cumplimiento de la demanda.

6.5.1. Modelo de asignación: Para dar respuesta al problema de generación de turnos se puede diseñar un modelo basado en el *set covering problem* (problema de cobertura de conjuntos).

Las variables a considerar son:

i : Periodo

j : Turnos posibles

D_i : Número de conductores trabajando en el periodo i .

$MaxD_i$: Número máximo de conductores trabajando en el periodo i .

$MinCD_i$: Número mínimo de conductores en descanso en el periodo i .

$MaxCD_i$: Número máximo de conductores en descanso en el periodo i .

A_{ij} : Matriz de 1 y 0, 1 si el periodo i es un periodo de trabajo para un turno j , de lo contrario 0.

B_{ij} : Matriz de 1 y 0, 1 si el periodo i es un periodo de descanso para un turno j , de lo contrario 0.

X_j : Cantidad de conductores a asignar a un turno j

M_{ij} : Cantidad de conductores a descansar en un periodo i para un turno j

C_j : Suma de los periodos asignados a cada turno j .

$$Min(z) = \sum_j C_j * X_j \quad (32)$$

s.a

$$\sum_j A_{ij} * X_j - \sum_j M_{ij} \geq D_i \quad (33)$$

$$\sum_j A_{ij} * X_j - \sum_j M_{ij} \leq MaxD_i \quad (34)$$

$$\sum_j B_{ij} * X_j \geq MinCD_i \quad (35)$$

$$\sum_j B_{ij} * X_j \leq MaxCD_i \quad (36)$$

La Ec. 32 corresponde a la función objetivo la cual busca determinar el valor mínimo de conductores a asignar a cada turno. En la Ec. 33 se garantiza el cumplimiento de la demanda para un periodo determinado siempre y cuando en la generación de turnos se encuentre habilitado el periodo para ese turno particular. Además se obtiene el número de conductores que pueden descansar en un periodo habilitado para dicha labor. La Ec. 34 garantiza que en un periodo habilitado dentro de un turno no se asigne una mayor cantidad de conductores a la establecida por el modelo. La restricción de la Ec. 35 garantiza que exista un límite mínimo de conductores descansando en un periodo habilitado para descansar. La restricción de la Ec. 36, garantiza un límite máximo de conductores descansando en un periodo habilitado para descansar.

A continuación en la Fig. 7 se observan los datos básicos de entrada del modelo dentro de los cuales se encuentra la demanda y los periodos definidos de operación (horarios), datos de salida de los modelos de la sección 3.2. y 3.4.

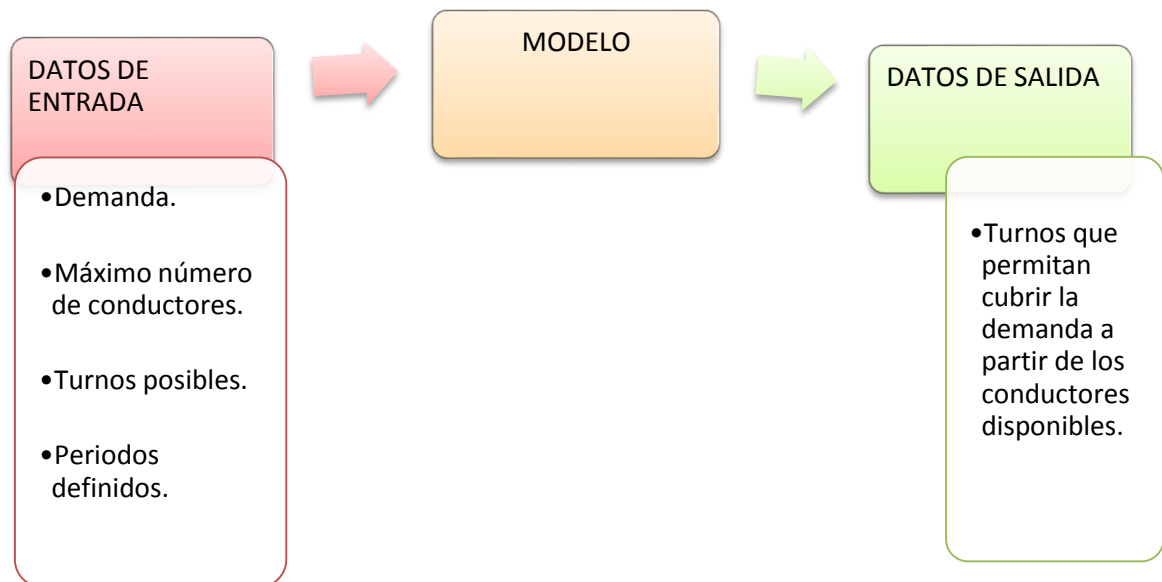


Figura 7: Entradas y salidas del modelo para asignación de turnos. Fuente: elaboración propia.

6.5.2. Modelo de asignación de turnos para la operación de sistemas de transporte masivo tipo BRT [34]

Para el caso del transporte, un método muy utilizado es el cubrimiento de conjuntos o set covering, el cual tiene como principio satisfacer la demanda a partir de la asignación de una cantidad de conductores en un periodo determinado. Este problema es adecuado para la asignación de turnos y envuelve la planeación en intervalos de tiempos en los cuales se tiene en cuenta los tiempos de trabajo, descanso y relevo para un grupo de conductores. Este principio debe tener en cuenta dónde las tripulaciones pueden iniciar o terminar un turno para un intervalo de tiempo determinado, la cantidad de piezas de trabajo a cubrir y la demanda para determinado periodo.

El modelo matemático del SCP se puede representar a través de una variable de decisión binaria, una matriz y un vector de costos.

X_j : Variable que toma el valor de 1 si la tarea está en la solución y 0 de lo contrario,

A_{ij} : Matriz de orden $m \times n$, cuyos elementos $A_{ij} \in \{0,1\}$,

C_j : Vector de costos con n elementos en el cual cada componente corresponde al costo asociado de la columna j de la matriz A .

$$\min z(x) = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (37)$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^n A_{ij} X_j \geq 1, i \in M \quad (38)$$

$$X_j \in \{1,0\} \quad j \in N$$

La Ec. 37 del modelo busca el cubrimiento de las tareas a partir de los recursos disponibles al menor costo posible, el cual debe garantizar la utilización de todos los recursos disponibles con la Ec. 38 y el carácter binario de la variable de decisión.

Según, Titiyevskael objetivo general de este modelo de solución es construir horarios de trabajo para un conjunto de empleados de cualquier compañía que

pueda satisfacer la demanda del servicio prestado. Este proceso puede ser analizado de la siguiente manera:

- Determinar cuántos empleados son necesarios en los diferentes periodos sobre un horizonte planeado.
- Asignación de tareas.
- Creación de líneas de trabajo.

6.5.3. Algoritmo genético como técnica de solución al problema de asignación de conductores a los despachos (creación de itinerarios) [35]: Los algoritmos genéticos son ampliamente utilizados en tareas de optimización y específicamente en la programación de vehículos de Transporte Público Colectivo Urbano, debido a que es un problema complejo que no siempre puede resolverse con técnicas de optimización convencionales. A continuación se presenta resumidamente en que consiste el algoritmo genético híbrido, que combina los mecanismos de los algoritmos genéticos con otras heurísticas.

El primer paso consiste en generar la tabla de despachos, para lo cual es necesario tener datos como: duración de recorridos, horario de servicio, tiempo de terminal e intervalos de despacho.

Los cromosomas representan cada día de trabajo, siendo cada gen un despacho del día. Entonces el cromosoma tendrá un número de genes igual al número de despachos que se realizan durante el día y quedará conformado por los vehículos asignados a cada uno de los despachos. La codificación de los genes se hace en decimal, asignándole el número correspondiente a la rutina que se programa para ese despacho.

Para generar la población se utiliza una heurística para almacenar los vehículos disponibles para cada uno de los despachos y antes de realizar cada asignación se consulta si existen rutinas o vehículos disponibles para ese despacho. Si no hay disponibles, se asignará un nuevo valor aleatoriamente. Las rutinas o vehículos disponibles son las que han hecho el recorrido completo y se pueden volver a programar para el siguiente despacho. Cabe anotar que cada vehículo es manejado por un solo conductor, así que cuando se asigna un vehículo implícitamente se asigna el conductor.

Cuando se crean dichos itinerarios se generan tiempos de espera de acuerdo a la programación, el objetivo en este problema es minimizar esos tiempos de espera lo

que lleva a usar el mínimo tamaño de flota, beneficiando tanto al operador de la ruta como al usuario.

6.5.4. Método de Branch & Price para solucionar problema de generación de turnos [36]: El método Branch & Price es una importante técnica para la solución de problemas de programación lineal con demasiadas columnas para manejar eficientemente donde la gran mayoría de sus variables estarán asociadas a cero en la solución óptima. Este método integra el algoritmo Branch and Bound y la generación de columnas.

Este algoritmo es usado por varios autores para la solución de problemas de asignación de personal a turnos de trabajo, ya que es una gran herramienta para la solución de modelos grandes de programación lineal entera. Branch & Price parte de una solución basado del método generación de columnas que es reconocido en la literatura como una estrategia de solución para cierto tipo de problemas lineales de gran escala. La generación de columnas toma mayor relevancia cuando se considera su aplicación dentro de estrategias para la solución de problemas enteros o mixtos, bien sea mediante métodos exactos como el algoritmo Branch & Price o cuando se emplea para la construcción de heurísticas para la solución de dicho tipo de problemas

El algoritmo Branch & Price parte de un modelo en el cual un conjunto de columnas son dejadas fuera, con el objetivo de realizar una relajación de la programación lineal cuando el problema no puede ser resuelto directamente (Titiyevska, 2006). Este algoritmo funciona en primera instancia mediante la implementación del problema auxiliar Pricing Problem, el cual genera la evaluación de las columnas que deben adicionarse a la base inicial hasta dar solución a la relajación del problema. La segunda instancia es la ramificación o Branching, la cual ocurre cuando no pueden hallarse columnas para adicionar a la base inicial y la solución del problema relajado no satisface las condiciones de integralidad. Estas instancias dan como resultado la minimización del costo de la función objetivo del problema lineal planteado.

Es importante resaltar, que el algoritmo avanza iterativamente buscando una reducción de la función objetivo, seleccionando, con algún criterio definido, alguno de los subproblemas activos, ramificando este subproblema y hallando el valor óptimo de la relajación lineal de los problemas obtenidos al ramificar. Para la evaluación de los distintos subproblemas se hace uso del esquema de generación de columnas.

7. DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS EN LA RUTA 27

Después de hacer una revisión sobre el tema de planificación de transporte, desde las consideraciones que responden a la percepción del servicio, hasta los problemas propios de la operación de una ruta, es posible realizar el diagnóstico de los problemas que presenta la ruta 27 que conecta a La Virginia con Pereira; evaluando inicialmente cada uno de los requerimientos planteados por los usuarios.

Con base en la Tabla 1 (Requerimientos de un sistema de transporte) se identifican a los tres actores que intervienen en la prestación del servicio de transporte público: Usuarios, proveedores y comunidad.

Como en todo mercado donde hay poca o ninguna competencia, el proveedor es quien termina poniendo las condiciones y el usuario se ve en la obligación de acogerse dada la necesidad. El caso del transporte público es un claro ejemplo, pues los usuarios a pesar de que no ven cumplidos algunos de sus requerimientos siguen haciendo uso del transporte público que se les ofrece a raíz de la necesidad de movilizarse, y así viven los habitantes de La Virginia quienes día a día se movilizan en la ruta 27 para llegar a sus lugares de trabajo, estudio, citas médicas, entre otras, a la ciudad de Pereira.

También es importante aclarar que muchas veces las malas condiciones del servicio se generan por la falta de control por parte de la secretaria de tránsito de La Virginia, la cual tiene como función regular y controlar todo lo relacionado con el funcionamiento del tránsito y transporte terrestre público y privado dentro de la jurisdicción del municipio de La Virginia en concordancia con las leyes que rigen el territorio nacional [37].

La ruta 27 moviliza alrededor de 10.000 personas diariamente [38], la cual la mayor parte del tiempo va totalmente ocupada incluso con un gran número de personas de pie, quienes viajan la totalidad del trayecto en esta condición. Cabe anotar que la ruta 27 de La Virginia – Pereira hace uno de los recorridos más largos de Pereira

Ahora bien, es importante para efectos del presente trabajo identificar las consideraciones del usuario y de la comunidad.

7.1. REQUERIMIENTOS DEL USUARIO

7.1.1. La disponibilidad: Esta característica hace énfasis en alta frecuencia de salida de buses, y cubrimiento horario del servicio el cual se espera que vaya desde tempranas horas hasta altas horas de la noche.

Para el caso de la ruta 27, gran parte de los usuarios que la abordan en La Virginia necesitan desplazarse a la ciudad de Pereira a sus lugares de trabajo y de estudio, por lo que deben estar desde 6, 7 u 8 la mañana, y por esta razón necesitan disponibilidad del transporte desde las 4 y media de la mañana, de manera que quien deba llegar a las 6 am lo pueda hacer puntualmente.

Actualmente la disponibilidad de la ruta 27 es muy conveniente para los usuarios puesto que el servicio de transporte desde La Virginia a Pereira comienza a prestarse desde las 4 y media de la mañana y desde Pereira a La Virginia hay servicio hasta las 10 y media de la noche, lo que es un cubrimiento de jornada muy acertado para las personas que deben movilizarse hacia Pereira desde muy temprano y volver a La Virginia tarde.

En cuanto a la frecuencia, la ruta 27 (desde La Virginia a Pereira) ofrece servicio en promedio cada 6 minutos, esto a simple vista es positivo dado que los tiempos de espera del usuario son cortos, pero la realidad es que esta frecuencia de salida no está ajustada a la demanda real, ya que la demanda varía durante el día y durante la semana, (además de temporadas) por ejemplo: es totalmente diferente la demanda presentada entre las 5:30am - 7:30am (que es el horario donde las personas en su mayoría abordan la buseta para ir a Pereira a trabajar, a estudiar, etc.), a la demanda existente entre las 3:00 pm-5:00 pm donde no existe una razón común a muchos usuarios para viajar a dicha hora.

El hecho de que la frecuencia no corresponda a la demanda genera dos tipos de problemas:

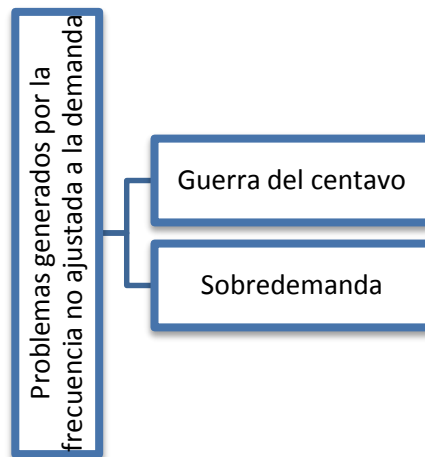


Figura 8. Problemas generados por la frecuencia no ajustada. Fuente: Elaboración propia

El primer problema, la “Guerra del centavo” referenciado en la Fig. 8 se presenta en las franjas horarias en las que la demanda no es alta y por lo tanto la frecuencia de salida de cada 6 minutos genera que algunos conductores conduzcan a una velocidad lenta mientras esperan que se acumule la demanda a lo largo del camino. Cabe anotar que esto se presenta por la modalidad de salario que tienen los conductores de la Ruta 27, la cual consiste en que el conductor debe hacer una entrega fija de dinero diariamente al dueño de la buseta, el resto de lo percibido se convierte en la remuneración o ganancia del conductor, por lo anterior el valor a recibir diariamente depende en gran parte del número de pasajeros que movilicen y por esto ellos se ven obligados a recoger el máximo de pasajeros diarios.

En este orden de ideas, si el conductor tiene asignado un turno en una hora donde la demanda no es alta y se percata de que ha movilizado pocos pasajeros al día, muy posiblemente va a conducir a una velocidad lenta, donde el intervalo de tiempo de 6 minutos que separa un turno del otro no es suficiente, hasta llegar a encontrarse en un punto determinado dos busetas, las cuales por el afán de recoger a los usuarios que están en el resto de trayecto manejan a altas velocidades y con falta de prudencia, poniendo en peligro a los transeúntes y a los mismo pasajeros.

Por otro lado la “Sobre demanda”, problema referenciado en la Fig. 8, se da durante las franjas horarias en que la demanda es muy alta y la frecuencia de salida cada 6 minutos no garantiza el cubrimiento de la demanda, generando buses con sobrecupo, generando inseguridad en el viaje e incomodidad. A pesar

de esto los usuarios abordan el vehículo, ya que aunque esté lleno el vehículo por la personas tienen necesidad de llegar a tiempo a sus lugares de trabajo, de estudio, entre otros.

En vista de lo anterior es importante que en la etapa de planificación de la ruta 27 como elemento del SITP Megabus se realice un estudio de demanda que permita tener un acercamiento a la cantidad real de usuarios de la ruta diferenciado por horas del día y por días de la semana.

7.1.2. Puntualidad: esta característica depende de muchos factores como el tráfico, la frecuencia de salida, la velocidad, acontecimientos (accidentes, procesiones, desfiles, etc.), número de paradas a recoger y/o dejar pasajeros, entre otros. Los pasajeros aceptan ciertos rangos de demoras y estos van dependiendo de la distancia que tenga que recorrer. Los usuarios de la ruta 27 están acostumbrados a rangos grandes de demora, el tiempo de viaje va desde una hora hasta una hora y media, presentándose los tiempos más altos en horas de la mañana (desde La Virginia a Pereira), pues el conductor debe realizar muchas paradas para recoger pasajeros a lo largo del recorrido, también se presentan tiempos altos en los viajes en horas pico (Pereira – La Virginia), ya que se presenta alto tráfico que genera trancones en las vías principales como lo es la Av. 30 de Agosto por donde circula la ruta 27.

7.1.3. Tiempo de viaje: este tiempo está compuesto por tiempos de espera, caminata desde/hacia el paradero y tiempo de transporte en el bus. El recorrido de la ruta 27 tiene un tiempo de espera corto puesto que la frecuencia de salida actualmente es alta, 1 salida cada 6 minutos, el tiempo de caminata desde y hacia el paradero varía, puesto que la ruta 27 no tiene paraderos predeterminados por lo que es una ventaja para los usuarios ya que pueden salir al lugar más cercano por donde pase la ruta y allí abordarla. En cuanto al tiempo de recorrido que es el más representativo dentro del tiempo de viaje, varía de acuerdo a la hora del recorrido puesto que de esto depende el tráfico, la demanda, etc., sin embargo como se dijo anteriormente el trayecto de La Virginia – Pereira es uno de los más largos de Pereira el cual dura entre 1 y 1 hora y media

7.1.4. Comodidad: este requerimiento de los usuarios traduce básicamente en que el usuario espera poder viajar sentado durante el recorrido y que el viaje como tal (sobre la carretera) no presente saltos debido al mal estado de la carretera o al manejo del vehículo. Cada día la ruta 27 transporta miles de

pasajeros tanto sentados como de pie, en el 2009 esta ruta transportó 16041 [20] viajes diarios, de los que 6646 corresponden a viajes que abordan en La Virginia. En el 2013 se pasó de 16041 viajes diarios a 11000, de los cuales 6500 corresponden a viajes de La Virginia.

De este número importante de viajes diarios transportados, en las horas pico es donde se ve mayor número de usuarios que viajan de pie; por ejemplo en el trayecto de La Virginia- Pereira en horas de la mañana (de 5am a 7am) el bus sale de La Virginia totalmente lleno esto incluye hasta 25 pasajeros de pie que viajan así durante una hora o más para llegar a su destino en Pereira. En otras horas de menos congestión los usuarios que abordan el bus con las sillas ocupadas, lo hacen ya llegando a Pereira por lo que el tiempo que viajan de pie es menor, y esto es importante en el sentido de que si bien es incómodo para el que aborda en Pereira, es el usuario de La Virginia quien permanece más tiempo viajando. El hecho de que en el vehículo vayan muchas personas viajando de pie genera no solo incomodidad para estos sino para los que van sentados en las sillas que lindan con el pasillo del bus.

Por último, en cuanto al viaje como tal, todas las vías por donde transita la ruta 27 están completamente pavimentadas por lo que ya solo depende del conductor que maneje correctamente, y esto si varía de uno a otro.

7.1.5. La conveniencia: este factor es importante si los usuarios tienen diferentes alternativas de ruta por el mismo recorrido, lo que no es el caso de los usuarios de La Virginia que solo tienen la Ruta 27 para movilizarse hacia Pereira por la Av. 30 de Agosto.

7.1.6. La seguridad: esta característica depende tanto del servicio como de factores externos. Del servicio se hace referencia a la forma de conducir del conductor y la cantidad que pasajeros que llegue a recoger el conductor que pueda generar sobrecupo. Los factores externos se refieren a robos, accidentes generados por otros medios de transporte, etc.

En cuando a la seguridad que corresponde al servicio, la ruta 27 es bien conocida por las altas velocidades [39] [40] que manejan los conductores cuando están retardados y necesitan llegar en pocos minutos al lugar donde está ubicado el reloj de control. También hay altas velocidades en la “guerra del centavo”, donde los conductores tratan de alcanzar al que ha salido antes para lograr mayor número de pasajeros. Por otro lado frente al número de persona

dentro del vehículo, la ruta 27 también tiene este problema, pues por la misma necesidad que tienen los conductores de recoger la cuota fija que deben pagar a los dueños de los vehículos, no tienen ningún límite de personas en la buseta, sino que llenan los vehículos hasta el punto de llevar personas casi colgando de las puertas.

Todos estos casos solo generan inseguridad a los usuarios y también a los transeúntes y demás vehículos que circulan por las mismas vías de la ruta 27.

7.1.7. Costo: este último requerimiento del usuario, es beneficioso para los usuarios de la ruta 27, en especial los que la abordan desde y hasta La Virginia, ya que pagan la misma tarifa (\$1700 COP) que pagan quienes se movilizan dentro de Pereira. Además de esto existen subsidios para estudiantes de estratos 1 y 2.

Ahora bien, otro autor Juan Carlos Muñoz [41], muestra de una forma un poco diferente y desagregada los requerimientos del usuario:

COMPONENTES DEL TIEMPO DE VIAJE
Tiempo en el vehículo
Tiempo de espera
Tiempo de caminata
EXPERIENCIA DEL TRANSBORDO
Número de transbordos
Diseño de las estaciones de transbordo
Infraestructura de estaciones de transbordo
COMFORT Y DENSIDAD DEL TREN
Ocupación media
Posibilidad de no abordar
Posibilidad de no obtener asiento
VARIABLES TOPOLÓGICAS
Distancia de la ruta
Número de estaciones
Costo angular
Ruta razonable

Tabla 4. Atributos de elección de ruta. Fuente: Jornada académica 1. Planeamiento y operación de sistema de transporte público.

Se observa que el primero recuadro de la Tabla 4 contiene 3 atributos que corresponden a lo que anteriormente se llamó tiempo de viaje. En el siguiente recuadro el autor lo llama experiencia de transbordo, los cuales son atributos que se estudian cuando existe una integración que genera diferentes opciones, lo cual no es el caso de la ruta 27, y en el caso de que se integrara sigue siendo una única opción para llegar a la estación, ya que la ruta 27 sería un alimentador que movilizaría a los usuarios al intercambiador más cercano.

Los atributos del tercer recuadro sobre el confort en el vehículo no se ven cumplidos en la ruta 27, pero aun así esto no es razón para que los usuarios no hagan uso del servicio.

El último recuadro, nuevamente corresponde a usuarios que tienen acceso a un sistema integrado de transporte público donde pueden elegir entre diferentes rutas.

Después de tener claro los requerimientos del usuario y detectar el estado actual respecto a estos, es importante también identificar los requerimientos de la comunidad que es la que finalmente actúa como evaluadora del servicio.

7.2. REQUERIMIENTOS DE LA COMUNIDAD

7.2.1. Calidad del servicio: la comunidad espera que el transporte como un servicio público sea de calidad, que los usuarios puedan transportarse seguros y sin contratiempos, ya sea viaje por estudio, trabajo, recreación, entre otros.

La comunidad frente a la ruta 27 tiene críticas por la calidad, en cuanto a la inseguridad del viaje cuando el vehículo va muy lleno, o por las altas velocidades que alcanzan estos vehículos cuando les queda poco tiempo para llegar al control. A pesar de esto, el uso de este servicio no disminuye por no haber más oferta, siendo la ruta 27 la única opción; y a pesar de las quejas el servicio poco mejora.

6.2.2. Objetivos sociales: este requerimiento es bastante amplio ya que le social se refiere a diversos sectores. Al ser la ruta 27 el medio que moviliza a los habitantes de La Virginia a Pereira, siendo un porcentaje importante de uso para estudiantes, la comunidad espera que existan tarifas especiales a partir de subsidios para los estudiantes. Esto actualmente es una realidad gracias a subsidios de la alcaldía como de la gobernación, pero no cubre a la totalidad de los estudiantes.

7.2.3. Impactos al medio ambiente: el mantenimiento al parque vehicular es importante para que los impactos negativos al medio ambiente mengüen. La comunidad poco se pronuncia frente a esto, puesto que no existe la conciencia ambiental generalizada, lo cual conlleva a que no existan preocupaciones por la contaminación que puedan generar los buses que realizan el recorrido de la ruta 27.

8. RELACIÓN ENTRE PROBLEMAS DE PLANIFICACIÓN DE TRANSPORTE

Después de revisar algunos problemas que se presentan en la planificación de transporte:

- Recolección de la información
- Determinación de frecuencia
- Determinación de tamaño de flota
- Creación de horarios de operación
- Asignación de turnos a conductores

Los cuales son los más básicos dentro de este proceso y fueron elegidos por ser los más representativos para la ruta 27, fue posible evidenciar en los figuras de entrada y salida del modelo que los datos de entrada de algunos modelos corresponden a los datos de salida de otros. De esta manera existe una interacción entre los mismos, la cual permite tener una idea del orden con el que se deben ir abordando.

Es importante aclarar que algunos de los datos de entrada de los modelos no corresponden a datos de salida de otro modelo sino que son datos ya dados por el operador del transporte de acuerdo a los recursos del mismo por los costos a los que está dispuesto a cubrir o por condiciones dadas por los entes de control. Por ejemplo la hora de inicio y finalización de operación de una ruta puede estar fijada por el operador de la ruta de acuerdo a la viabilidad económica o puede haber sido ya dispuesta por la secretaria de tránsito.

Entonces según lo anterior se puede dividir los datos de entrada en datos hallados y datos fijados. Siendo los primeros los hallados al solucionar problemas previos y los otros serían los ya dados por el operador o entes de control. Ahora bien, si existe alguna relación entre los mismos se puede entonces determinar la secuencia en

que se deben ir solucionando los mismos, y si existen algunos que pueden ser abordados simultáneamente.

En la Fig. 9 se observa la manera en que los problemas se relacionan de acuerdo a sus datos de entrada y salida, y de acuerdo a esta la recolección de información será sin lugar a dudas la primera etapa, puesto que esta permite recolectar la información concerniente a la demanda. Al tener el dato de la demanda definido es posible abordar el problema de la determinación de frecuencia y el problema de asignación de turnos a conductores, puesto que para estos dos problemas el único dato hallado es la demanda componiendo así la segunda etapa. Para el problema de determinación de tamaño de flota es necesario tener como datos hallados la demanda y la frecuencia de operación, por lo tanto este problema se convierte en la tercera etapa. Por último está el problema de determinación de horarios, el cual necesita como datos hallado la frecuencia de operación y el tamaño de flota, siendo así la cuarta etapa.

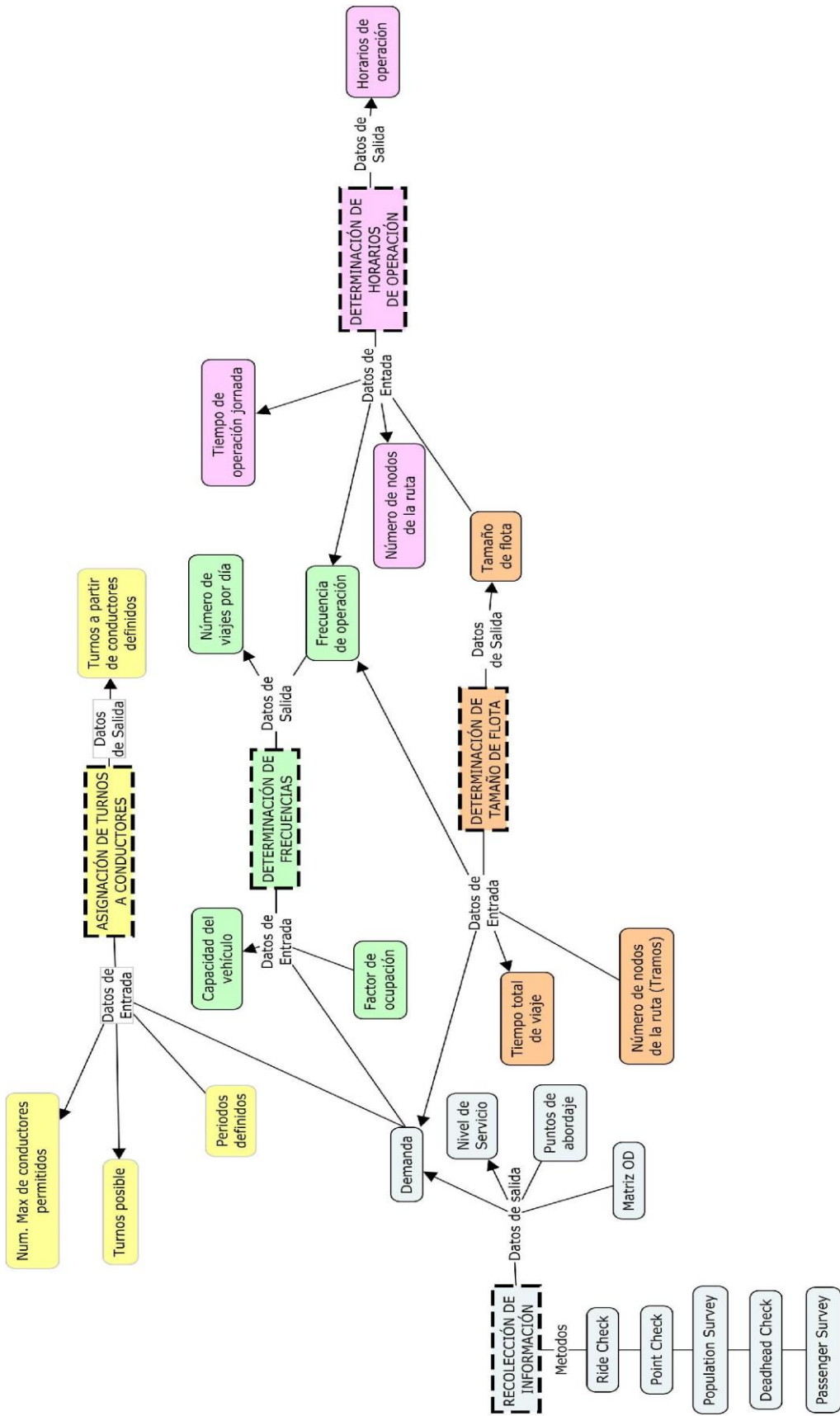


Figura 9. Relación entre problema de planificación de transporte. Fuente: Elaboración propia.

9. PROPUESTA DE INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Como se aclaró en los capítulos anteriores para dar solución a cualquiera de los problemas detectados en la ruta 27 es necesario además de otras cosas recolectar información sobre demanda, tiempo, etc. lo cual servirá como input de los modelos. El principal dato es la demanda, puesto que es la información que da pie a la resolución del primer problema de planificación que es la determinación de la frecuencia. De ahí en adelante existen más tipos de información que comienzan a ser necesarias a medida que el proceso de planeación se hace efectivo con la operación de la ruta, pero inicialmente la demanda es el primer paso.

Por lo anterior en el presente trabajo se propone dos instrumentos de recolección para ser probado y posteriormente implementado, en los cuales se indica el método de recolección de acuerdo a las características de la ruta y de la información demandada. El primer instrumento es para ser diligenciado por el encuestador el cual se basa y responde a las necesidades principales de información que se tienen. El segundo busca recolectar información un poco más cualitativa que puede servir para etapas posteriores de la planificación con el fin de prestar un servicio óptimo y acorde a las necesidades de los usuarios.

9.1. FORMATO DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE DEMANDA DE PASAJEROS RUTA 27 DILIGENCIADO POR EL ENCUESTADOR

Objetivo: Conocer la demanda de pasajeros de la ruta 27 en diferentes franjas horarias con el fin de determinar frecuencias de operación adecuadas para cada una.

Responsable: Aforador.

Fecha: _____

Hora de salida de la buseta: _____

Número de la buseta: _____

Encuestas entregadas: _____

Encuestas recibidas: _____

PUNTOS ESTRATÉGICOS	PASAJEROS A BORDO	HORA
Salida de La Variante		
Cerritos		
Estación El Viajero		

OBSERVACIONES: _____

9.2. FORMATO PROPUESTA DE ENCUESTA PARA SER AUTODILIGENCIADA POR LOS USUARIOS

1. Edad: _____

2. ¿Vive usted en La Virginia?

SI		NO	
----	--	----	--

Si su respuesta a esta pregunta es NO le agradecemos por su participación en la encuesta y le pedimos que no continúe diligenciándola sino que espere a que la persona encargada de esta labor pase por su puesto recogíendolas. Si su respuesta fue SI por favor continúe.

3. ¿En qué barrio vive? Si no encuentra el suyo marque con una x el barrio más cercano.

San Cayetano	Balsillas	Buenos Aires	La playa
Centro	Alfonso López	Expansión Norte	Los almendros
Tangerife 1	Restrepo	Libertadores	La Variante
Tangerife 2	Santa Fe	El progreso	Pedro Pablo
El prado	Bairon Gaviria	Pio XII	Restrepo

4. Marque con una x la razón por la que se encuentra viajando hoy.

Cita médica		Diversión	
Estudio		Visita Familiar	
Trabajo		Diligencias	
Entrevista		Otros	

5. Escriba el nombre del barrio, o del lugar al que usted se dirige. (Si es una universidad, hospital, centro comercial, etc., colocar el nombre de este:

6. Aproximadamente con qué frecuencia viaja usted a Pereira?

1 vez cada 2 meses		1 vez por semana	
1 vez por mes		2 a 3 veces por semana	
2 a 3 veces por mes		4 a 5 veces por semana	
		6 a 7 veces por semana	

7. Marque con una x la razón por la que más viaja a Pereira

Cita médica		Diversión	
Estudio		Visita Familiar	
Trabajo		Diligencias	
Entrevista		Otros	

8. ¿Cuál es el horario en que habitualmente viaja?

4:30am – 7:00am		2:05pm – 4:00pm	
7:05am – 10:00am		4:05pm – 6:00pm	
10:05am – 12:00m		6:05pm – 8:00pm	
12:05pm – 2:00pm		8:05pm – 9:30pm	

Gracias por su colaboración, pedimos disculpas por las molestias causadas.

9.3. RECOMENDACIONES Y ACLARACIONES SOBRE LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE DEMANDA DE PASAJEROS Y ENCUESTA EN LA RUTA 27

Esta recolección de información es útil dado que permite mejorar el servicio al conocer más a fondo las características de la demanda, desde aspectos generales hasta específicos. Si bien la información necesaria para la puesta en marcha de la ruta no es tan extensa puesto que básicamente se necesita conocer la demanda en diferentes horarios del día para identificar las franjas horarias que permitan determinar unas frecuencias de operación apropiada para los diferentes momentos del día, se puede sacar provecho de este proceso de recolección entregando encuestas a los usuarios que van a bordo y así obtener otra información que puede ser usada para mejoras futuras del servicio.

Se recomienda entonces usar el método Ride Check el cual se caracteriza porque el encuestador va a bordo. Al ser un trayecto extenso es posible realizar la encuesta totalmente diligenciada por el usuario, cabe anotar que esta lleva preguntas cortas y con respuesta de selección múltiple, la cual debe ser entregada solo a los pasajeros que vayan sentados.

Para la recolección de la demanda el encuestador deberá tomar nota del número de personas en tres puntos específicos:

- Salida de La variante
- Cerritos
- Estación El viajero.

Se propone que esta encuesta se realice desde las 5:30 am hasta las 9:30 pm (el cual es el horario en que Líneas Peregrinas presta el servicio desde La Virginia hasta Pereira) comenzando a las 5:30 am con avance de una hora, es decir, luego a las 6:30 am, luego a las 7:30 am y así sucesivamente hasta llegar a las 9:30 pm.

Esta toma se hace en diferentes horas para lograr identificar horas pico que no se estén teniendo en cuenta, además de que debe hacerse en cada uno de los días de la semana, para detectar y cuantificar las diferencias que se generan entre días hábiles y festivos.

10. CONCLUSIONES

- Después del diagnóstico realizado a la ruta 27 se identificaron serios problemas en la operación de la misma como la frecuencia con la que actualmente está operando la cual no responde a la demanda que la misma tiene en la diferentes horas y días de la semana, lo cual genera una serie de dificultades que deben enfrentar los usuario de la ruta 27 como los excesos de velocidad, el alto tiempo de recorrido, la incomodidad que viven a diario los pasajeros, entre otros.
- Se identificó falta de planificación y procesos de mejora en la ruta 27, la cual viene operando de la misma manera por años. Por lo anterior se encontró que en el marco de la integración de esta a MEGABUS es necesario que se lleve a cabo un proceso de planificación de la operación con el fin de no cometer los mismos errores, y por el contrario que pueda prestar un servicio que beneficie a los usuarios y la comunidad, dentro de este sistema integrado de transporte público (SITP).
- Para hacer frente a los problemas de planificación detectados en la ruta 27 se encontró en la literatura modelos matemáticos y técnicas de solución que permiten abordarlos considerando las variables más relevantes e influyentes de cada problema. Cabe anotar que los modelos encontrados presentan ciertas especificaciones de acuerdo a las características mismas del problema abordado por el autor, sin embargo la revisión de los mismos permite identificar los datos básicos de entrada y una idea general de cómo se podrían formular para el caso de la ruta 27 en trabajos futuros. Adicional se identificaron los datos de entrada y salida, y así fue posible encontrar una relación entre los mismos que permitió encontrar un orden lógico de cómo abordarlos.
- Se identificó que las metaheurísticas son las técnicas de solución más usadas dada la dificultad y magnitud de los problemas correspondientes a la planificación de transporte, y aunque estas no garanticen la solución óptima, los investigadores las utilizan por la buena calidad de los resultados que estas arrojan. Dentro de las metaheurísticas, una de las más utilizadas es el algoritmo genético el cual al combinarlo con otras heurísticas llega a ser más eficiente. Cabe anotar que en la literatura los algoritmos generalmente presentan 2 etapas, siendo la primera el ruteamiento el cual para este caso

ya está realizado pues el recorrido se encuentra definido, por lo que los algoritmos a construir en trabajos futuros para abordar los problemas planteados deben ser dirigidos al problema mismo sin pasar por la etapa de ruteo.

- Se determinó a través de proyecciones que la población afectada es de 3.226 personas, lo cual corresponde a aproximadamente 10% de los habitantes de La Virginia.

11.RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Abordar cada problema de planificación de los que fueron revisados, realizando las modificaciones necesarias a los modelos base conforme a las características de operación de la ruta 27. Cabe anotar la importancia de validar los modelos matemáticos con instancias de prueba antes de realizar la toma de datos y aplicar los métodos de solución correspondientes.
- Resolver los problemas de acuerdo al orden encontrado, conforme a la relación que existe entre ellos. (Ver capítulo 6).
- Implementar los formatos de recolección de información con el fin de determinar la demanda real por franjas horarias de la ruta 27, además de conocer la demanda por trayectos e información adicional que puede ser de utilidad para mejoras en el servicio.
- Construir matriz origen – destino para los usuarios de la Ruta 27 que viven en La Virginia, haciendo diferenciación en las franjas horarias.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Molinero, Evaluación y Requerimientos en el Transporte Urbano, México: Segunda Semana de Ingeniería de Transportes UPIICSA, 1982.
- [2] G. B. Dantzig y J. H. Ramser, «The truck dispatching,» *Management Science*, vol. 6, nº 1, pp. 80-91, 1959.
- [3] L. Bodin, B. Golden y M. Ball, «Routing and Scheduling of Vehicles and Crews: The State of the Art,» *Computers and Operations Research*, vol. 10, nº 2, pp. 63-211, 1983.
- [4] G. Laporte, Y. Nobert y D. Arpin, «An exact algorithm for solving a capacitated location-routing problem,» *Annals of Operations Research*, vol. 6, pp. 293-310.
- [5] A. Ceder, «Creating bus timetables with maximal synchronization,» *Transportation*, pp. 913-928.
- [6] H. Mercure, G. Laporte y Y. Nobert, «An exact algorithm for the asymmetrical capacitated vehicle routing problem,» *Networks*, nº 16, pp. 33-46, 1986.
- [7] M. Fischetti, P. Toth y D. Vigo, «A branch-and-bound algorithm for the capacitated vehicle routing problem on directed graphs,» *Operations Research*, nº 42, p. 1994, 846-859.
- [8] M. L. Fisher, «Optimal solution of vehicle routing problems using minimum k-trees,» *Operations*, nº 42, pp. 626-642, 1994.
- [9] P. Toth y D. Vigo, «The vehicle routing problem,» *Society of Industrial and Applied Mathematics (SIAM)*, 2002.
- [10] G. Dantzig y P. Wolfe, «Decomposition principle for linear programs,» *Operations*, nº 8, pp. 101-111, 1960.
- [11] G. Clark y J. Wright, «Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points,» *Operation Research*, vol. 4, nº 12, p. 568–581, 1964.

- [12] R. Mole y S. Jameson, «A sequential route-building algorithm employing a generalized savings criterion,» *Operations Research Quarterly*, nº 27, p. 503–511, 1976.
- [13] F. D. C. F. y. S. R. Robusté, «Implementing vehicle routing models,» *Transportation Research B*, nº 24, p. 263–286, 1990.
- [14] A. S. H. S. S. y. C. M. Alfa, «A 3-opt based simulated annealing algorithm for vehicle routing problem,» *Computers & Industrial Engineering*, nº 21, p. 635–639, 1991.
- [15] G. y. O. D. Barbarosoglu, «A tabu search algorithm for the vehicle routing problem,» *Computers and Operations Research*, nº 26, p. 255–270, 1999.
- [16] «DANE,» [En línea]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/proyecciones-de-poblacion>. [Último acceso: 14 Noviembre 2014].
- [17] «DANE censo 2005 La Virginia,» [En línea]. Available: http://www.dane.gov.co/files/censo2005/regiones/risaralda/la_virginia.pdf. [Último acceso: 21 Enero 2014].
- [18] «Periódico Electrónico: Diario del Otún,» [En línea]. Available: <http://www.eldiario.com.co/seccion/ESPECIALES/la-virginia-zona-de-trabajo-y-progreso121126.html>. [Último acceso: 30 Enero 2014].
- [19] «Las rutas más largas de Pereira,» *La Tarde*, 11 Marzo 2012.
- [20] G. A, *CONSTRUCCIÓN DE MATRIZ ORIGEN DESTINO DE TRANSPORTE PARA EL AMCO (2008 - 2012)*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.
- [21] «Recorrido Ruta 27 (UTP - La Virginia),» [En línea]. Available: <http://amco.gov.co/ruta-pereira-utp-la-virginia-pereira-utp-40.html>. [Último acceso: 23 Enero 2014].
- [22] «Periódico Electrónico La Tarde,» [En línea]. Available: <http://www.latarde.com/noticias/area-metropolitana/127808-las-rutas-alimentadoras-de-megabus-movilizan-a-97-mil-usuarios>. [Último acceso: 23 Enero 2014].

- [23] A. Ceder, *Public transit, planning and operation*, Oxford, UK: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2007.
- [24] C. y. N. W. A., «Bus network design,» *Transportation Research B*, vol. 20, pp. 331-344, 1986.
- [25] A. Mauttone, «Diseño óptimo de recorridos y frecuencias para transporte público,» Universidad de La Republica, Montevideo, 2007.
- [26] B. M. H. y M. H.S., «An AI-Based Approach for Transit Route System Planning and Design,» *Journal of Advanced Transportation*, vol. 25, pp. 187-210, 1991.
- [27] I. Y. y C. A., «Transit Route Design Using Scheduling and Multiobjective Programming Techniques.,» *Computer-Aided Transit Scheduling*, pp. 56-75, 1993.
- [28] N. S. y L. D. J., «Optimal Time Transfer in Bus Transit Route Network Design Using a Genetic Algorithm,» *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, pp. 21-23, 2000.
- [29] K. Rao y S. Muralidhar, «Public Transport Routing And Scheduling Using Genetic Algorithms.,» *Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, 2000.
- [30] C. A., G. B. y T. O., «Creating bus timetables with maximal synchronization,» *Transportation Research Part A*, nº 35, pp. 913-928, 2001.
- [31] C. A., «Methods for creating bus timetables,» *Transportation Rsearch Part A*, nº 21, pp. 59-83, 1986.
- [32] S. Chuanjiao, «Scheduling Combination and Headway Optimization of BRT,» *JOURNAL OF TRANSPORTATION SYSTEMS ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY*, vol. 8, nº 5, pp. 61- 67, 2008.
- [33] A. Eranki, *A model to create bus timetables to attain maximum synchronization considering waiting times at transfer stops*, Florida, 2004.
- [34] D. F. Quintero Moncada, *Diseño de un modelo de asignación de turnos para la operación de sistemas de transporte masivo BRT*, Chía, 2013.

- [35] J. A. Quintero, *Modelo de optimización para vehículos de transporte público urbano*, Manizales, 2005.
- [36] S. Titiyevska, *The shift scheduling problem using a branch-and-price approach*, Amsterdam, 2006.
- [37] «Secretaría de Tránsito de La Virginia: Misión,» [En línea]. Available: <http://www.lavirginiarisaralda.gov.co/dependencias.shtml?apc=dbxx-1-&x=1662764>. [Último acceso: 14 Marzo 2014].
- [38] P. S. J., «Periódico La Tarde,» 11 Marzo 2012. [En línea]. Available: <http://www.latarde.com/historico/57058-las-rutas-mas-largas-de-pereira>. [Último acceso: 28 Agosto 2014].
- [39] «Periódico El Diario del Otún,» [En línea]. Available: <http://www.eldiario.com.co/anteriores/24-9-2013/qued-entre-las-llantas-de-la-buseta1309.html>. [Último acceso: 12 05 2014].
- [40] «MIRA Movimiento Político,» [En línea]. Available: <http://movimientomira.com/la-virginia/5885-alta-velocidad-en-busetas-de-lineas-pereiranas-atenta-contra-la-salud-y-la-integridad-de-los-habitantes-de-la-virginia>. [Último acceso: 12 5 2014].
- [41] J. C. Muñoz, «Route choice modelling on metro networks: time, transfers, crowding, and topology,» *Transportation Research Part A*.
- [42] G. K. Kuah, *The Feeder Bus Route Design Problem*, Maryland: University of Maryland, 1986.
- [43] «Tiempo estimado de Recorrido-GOOGLE MAPS,» [En línea]. Available: <https://maps.google.es/>. [Último acceso: 2014 Enero 2013].