

**MODELO DE EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL
TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO EN MEDELLÍN CON
DIFERENTES TECNOLOGÍAS LIMPIAS**

ING. DANIEL ESTEBAN CEBALLOS PÉREZ

ING. JENIFER VANESSA PALACIO GÓMEZ



**UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE POSGRADOS
ESPECIALIZACIÓN EN VÍAS Y TRANSPORTE
MEDELLÍN - COLOMBIA**

2015

**MODELO DE EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL
TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO EN MEDELLÍN CON
DIFERENTES TECNOLOGÍAS LIMPIAS**

ING. DANIEL ESTEBAN CEBALLOS PÉREZ

ING. JENIFER VANESSA PALACIO GÓMEZ

Trabajo de grado para optar al título de Especialistas en Vías y Transporte

Asesor metodológico:

ING. CESAR AUGUSTO HIDALGO MONTOYA

Asesora temática:

ING. MARTA LUCÍA SUÁREZ GÓMEZ



**UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE POSGRADOS
ESPECIALIZACIÓN EN VÍAS Y TRANSPORTE
MEDELLÍN - COLOMBIA**

2015

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Este trabajo de grado se lo dedico a Dios, que siempre me dio fortaleza y aunque pase por muchas dificultades, siempre me brindo su bendición e iluminó mi corazón para tomar las mejores decisiones. A mis padres Stella y Humberto que son el motivo por el cual he llegado tan lejos, gracias por sus consejos y ayuda en todo este proceso. A mi novia y futura esposa Daniela, su apoyo incondicional y ánimo fueron indispensables en mi preparación. A mis compañeros de estudio, gracias por tantas enseñanzas y por el trabajo en equipo, todas las traspasadas valieron la pena. A los docentes y en especial a la Ing. Marta que tuvo tanta voluntad y deseo de colaborarnos con el desarrollo del presente trabajo, sus aportes siempre fueron acordes a su perfil y a su don de persona. A mi familia y amigos que siempre creyeron en mí, como persona y como profesional.

A todos ellos miles de gracias por tanto apoyo.

DANIEL ESTEBAN CEBALLOS PÉREZ

En primer lugar doy gracias a Dios porque siempre pone circunstancias y personas en mi camino que me ayudan a lograr mis objetivos. A nuestra asesora de trabajo de grado la Ing. Marta Suarez quien nos acompañó y orientó para el desarrollo de este proyecto. A mi compañero de trabajo de grado Daniel Ceballos por su dedicación y esfuerzo. A mi mamá Doris Stella Gómez que me apoyó incondicionalmente para lograr mis metas. A mi abuela Aminta Bayona quien se encargó de formar la persona que soy. A mi familia por su acompañamiento a lo largo de mi carrera.

JENIFER VANESSA GÓMEZ PALACIO

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO EXISTENTE | 12 |
| 2.1. Fuentes de energía y tipología del transporte público colectivo | 12 |
| 2.2. Transporte público en otros países | 18 |
| 2.2.1. Curitiba, Brasil | 18 |
| 2.2.2. Hong Kong, China | 21 |
| 2.2.3. Múnich, Alemania..... | 22 |
| 2.2.4. Viena, Austria | 22 |
| 2.3. Transporte público en Medellín | 23 |
| 3. MARCO TEÓRICO | 29 |
| 4. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA | 35 |
| 4.1. Normatividad para el transporte público en Colombia | 35 |
| 4.2. Definición tarifaria para usuarios en el transporte público | 37 |
| 5. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS PARA EL MODELO EVALUATIVO | 44 |
| 5.1. Definición de factores para la matriz multicriterio | 44 |
| 5.2. Definición de variables por factor y rangos de calificación | 45 |
| 5.2.1. Factor ambiental..... | 46 |
| 5.2.2. Factor rentabilidad del negocio | 48 |
| 5.2.3. Costos de operación | 49 |
| 6. PROCEDIMIENTO Y ELABORACIÓN DE MATRIZ MULTICRITERIO..... | 51 |
| 7. MANUAL DE PROCEDIMIENTO..... | 56 |
| 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 62 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA | 65 |
| ANEXO 1 – RESPUESTA DE EXPERTOS | 68 |
| ANEXO 2 - GLOSARIO | 72 |

CONTENIDO DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Emisión vehicular horaria de CO, NOx, VOC's, SO ₂ y TSP en la ciudad y parte del Valle de Aburrá..... | 3 |
| Figura 2. Emisión total diaria de CO, NOx, SO ₂ , TSP y VOC's (CH ₄ , no metanos, alquenos aromáticos, aldehidos)..... | 4 |
| Figura 3. Cantidad de vehículos por cada 100.000 habitantes. | 5 |
| Figura 4. Proceso de combustión en el motor a gasolina. | 12 |
| Figura 5. Ejemplo de Trolebús utilizado para el sistema de transporte público..... | 16 |
| Figura 6. Ejemplo de bus articulado y biarticulado utilizado para el sistema de transporte público. | 17 |
| Figura 7. Ejemplo de buseta utilizado para el sistema de transporte público. | 17 |
| Figura 8. Ejemplo de midibús utilizado en el sistema de transporte público. | 18 |
| Figura 9. Ejemplo de Bus Padrón utilizado en el sistema de transporte público. | 18 |
| Figura 10. Ejemplo de transporte expreso biarticulado. | 20 |
| Figura 11. Autobús híbrido (biodiesel-eléctrico) fabricado por la empresa Volvo, presta el servicio de alimentador en la RIT..... | 20 |
| Figura 12. Aspecto de bus de dos pisos en la ciudad de Hong Kong. | 22 |
| Figura 13. Tipología de autobuses encontrados en Múnich..... | 22 |
| Figura 14. Autobús padrón utilizado en Viena, Austria. | 23 |
| Figura 15. Sistema de transporte masivo de alta capacidad METRO..... | 24 |
| Figura 16. Sistema de transporte masivo de mediana capacidad METROCABLE. | 25 |
| Figura 17. Sistema de transporte masivo de mediana capacidad METROPLÚS..... | 25 |
| Figura 18. Proyecto sistema de transporte masivo de mediana capacidad TRANVÍA DE AYACUCHO. | 26 |
| Figura 19. Buses urbanos y del sistema integrado de transporte. | 27 |
| Figura 20. El servicio de taxis en la ciudad es muy numeroso..... | 27 |
| Figura 21. Ponderación de factores según la respuesta de expertos mediante la metodología DELPHI..... | 53 |
| Figura 22. Ventana "matriz". | 56 |
| Figura 23. Ventana "parámetros" para la fuente diesel. | 57 |
| Figura 24. Ventana "parámetros" para la fuente de energía gas natural (GNV)..... | 57 |
| Figura 25. Ventana "parámetros" para la fuente de energía eléctrica (catenaria). | 58 |
| Figura 26. Ventana "parámetros" para la fuente de energía eléctrica (batería)..... | 58 |
| Figura 27. Ventana "parámetros" para la fuente de energía eléctrica (plataforma). | 59 |
| Figura 28. Ventana "parámetros" para la fuente de energía híbrido. | 59 |
| Figura 29. Ventana "tablas", donde se encuentran los rangos de calificación. | 60 |
| Figura 30. Ventana "ponderación", donde se encuentran las respuestas de los expertos. | 60 |

CONTENIDO DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 - Normatividad para el transporte público en Colombia..... | 37 |
| Tabla 2. Análisis de respuestas de expertos de acuerdo a las medidas de tendencia central. . | 53 |
| Tabla 3 - Rango calificativo de variables. | 54 |

1. INTRODUCCIÓN

El municipio de Medellín está localizado en el centro del Valle de Aburrá, se encuentra segmentado por el trazado del río Medellín y éste lo divide en dos márgenes: oriental y occidental. Medellín tradicionalmente se ha clasificado como la ciudad de la eterna primavera, donde en el transcurso de años acá ha demostrado el poder de transformación e innovación de infraestructura vial y urbanismo, incluyendo al peatón y al ciclista dentro de sus parámetros a considerar para el desarrollo de la región. Asimismo que se tienen estos desarrollos, se van construyendo grandes centros inmobiliarios de usos residenciales, aumentando consigo la demanda de transporte y poniendo en situación crítica la accesibilidad a los barrios ubicados en la periferia de la ciudad, debido a la topografía tan agreste que éstas presentan.

De igual manera, en la ciudad de Medellín se aprecia el incremento desmedido del parque automotor y consigo un incremento en la emisión de fuentes contaminantes al medio ambiente, situación por la cual es necesario optar por otras fuentes de energía consideradas tecnologías limpias, como lo hacen hoy en día las grandes marcas de motocicletas y automóviles que lanzan al mercado sus prototipos eléctricos y a gas, rompiendo los paradigmas que estos han generado por tiempos. Esta idea se está llevando a cabalidad y no solo en automóviles y motocicletas, sino en otros tipos de vehículos que puedan generar un beneficio bastante notorio a cualquier inversionista y por qué no, hasta el mismo medio ambiente. A esta alternativa le están apostando los proveedores de otros países que aquellas fuentes de energía han generado muy buenos resultados en varios tipos de vehículos y hacen énfasis en aquellos en los que se tendría un mejor impacto, los que prestan el servicio de transporte público colectivo, ya que ayudan a mitigar e integrar todo tipo de variables tanto internas como externas a la posibles solución. Es por ello que la administración municipal en sinergia con la secretaria de movilidad, se la juegan a tratar de encontrar soluciones viables a tantos problemas en cuestión que hoy golpean nuestra ciudad.

Es así como con el presente trabajo se pretende crear un modelo evaluativo para la selección de una fuente de energía para el sistema de transporte público colectivo, que pueda ser implementada en nuestra ciudad, que permita integrar y a su vez mitigar los inconvenientes en materia de medio ambiente, inversión inicial, demanda y movilidad.

De acuerdo a los conceptos que se deben conocer y al contexto en el cual se desarrolla el presente trabajo, se presenta una descripción particular de cada una de partes que permiten entender e integrar los criterios que serán utilizados para el desarrollo del modelo evaluativo.

Como primera instancia se parte del estudio realizado por la Universidad Pontificia Bolivariana “Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión CORINAIR”, mediante el cual se determinan las emisiones en caliente de CO, NO_x, SO₂, TSP y COV’s para el tráfico en la ciudad. Las emisiones de COV’s fueron agrupados en cinco categorías: metano, alcanos, alquenos, aromáticos y aldehídos. El área total de estudio fue de 360 km², en la que se encuentra la red de tráfico que incluye las principales avenidas, calles y autopistas. Para la estimación de las emisiones, se desarrolló un modelo que calcula la emisión de celdas con resolución espacial de 1 km² y genera promedios de emisiones cada hora.

Los datos utilizados para el cálculo fueron: flujo vehicular en varios sitios de Medellín durante el periodo 1997-2000, número y tipo de vehículos en cada hora, longitud del tramo de las vías y los factores de emisión en caliente.

Como resultado del modelo, fue posible el cálculo hora a hora de los contaminantes analizados en cada una de las celdas. Las gráficas de intensidad de emisión mostraron que en general, el centro de la ciudad representa el área más afectada por el tránsito vehicular, siguiendo en importancia, la región centro occidental. Así mismo, para la zona analizada, se evidenciaron las mayores emisiones durante las horas pico que se presentaron a las 08:00 y las 19:00 horas.

La emisión total media horaria de los contaminantes analizados se ilustra en la *Figura 1*. Estos valores representan la tasa a la cual el poluyente es liberado a la atmósfera por unidad de tiempo, debido a la presencia del tránsito.

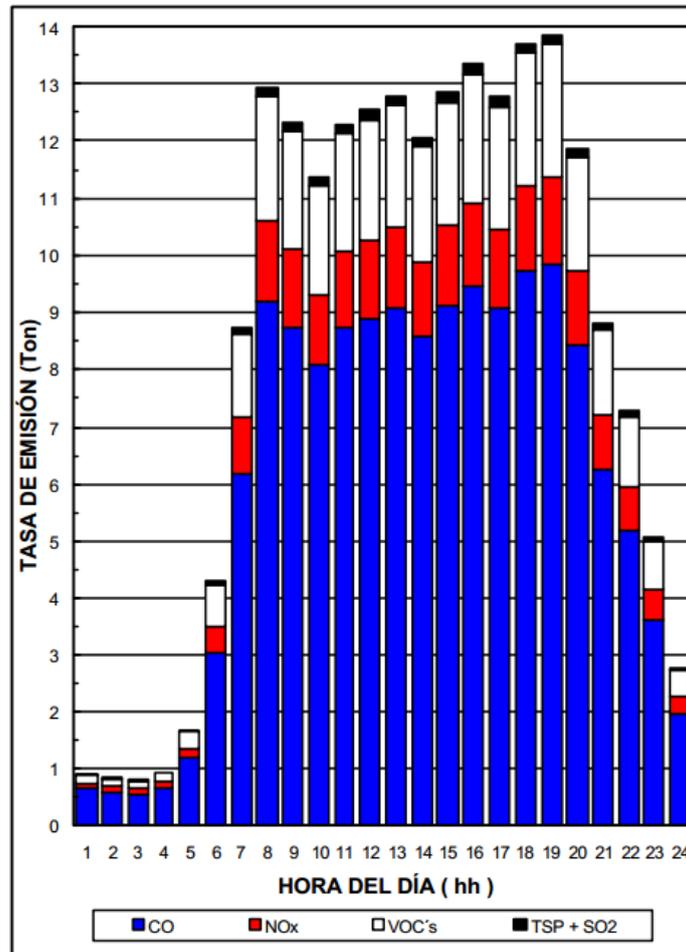


Figura 1. Emisión vehicular horaria de CO, NOx, VOC's, SO₂ y TSP en la ciudad y parte del Valle de Aburrá.

Fuente: Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión CORINAR.

En el *Figura 2* se presenta la emisión total media diaria de los contaminantes estudiados. Se observa que el monóxido de carbono es el contaminante que más emite la flota vehicular en la ciudad y parte del Valle de Aburrá.

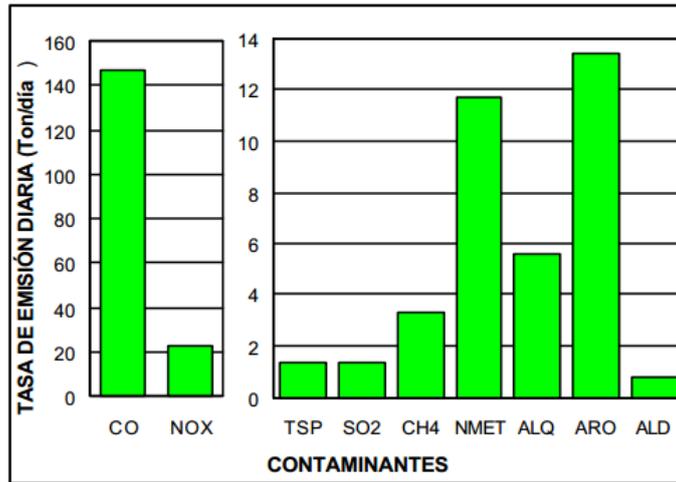


Figura 2. Emisión total diaria de CO, NOx, SO₂, TSP y VOC's (CH₄, no metanos, alquenos aromáticos, aldehidos).

Fuente: Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión CORINAR.

El anterior estudio y la situación actual del transporte público en Medellín, ha llevado a que la movilidad sea un factor determinante en su desarrollo, ya que ésta impacta de manera negativa o positivamente de acuerdo a la forma en cómo se desarrolle. Por ende en cuestión de movilidad, se incluye el tema del transporte público en los diferentes medios en el que se presenta para la ciudad, por lo tanto no deja de ser éste un tema que permite calificar el índice de servicio que estos prestan, evaluar la manera en cómo se integra con la infraestructura vial existente y la eficiencia en atender la demanda generada en las comunas del municipio. Por otro lado, se asume la idea en que los medios del sistema de transporte público tienen que atender la demanda que se genera por los principales corredores de la ciudad, pero lo crítico se vuelve cuando muchas de las rutas que se tienen trazadas convergen a un mismo corredor, siendo los causantes de las altas congestiones en las horas donde se presenta la máxima demanda vehicular, tiempos de espera altos, que ocasionan síntomas de saturación en la infraestructura vial actual.

De manera complementaria, se identifica en nuestra ciudad un aumento constante en el parque automotor, bien sea de vehículos particulares y de motos (que en otros sectores la participación de las motos es mayor a los vehículos particulares); así pues se están generando diferentes alternativas para costear la tenencia de un vehículo propio, mientras que las vías presentan las mismas especificaciones de diseño, situación que no es equitativamente proporcional con el incremento del mismo parque automotor. La anterior situación se presenta

en la *Figura 3*, el cual relaciona el crecimiento vehicular por cada 100.000 habitantes, iniciando desde el año 2008 hasta el año 2013.

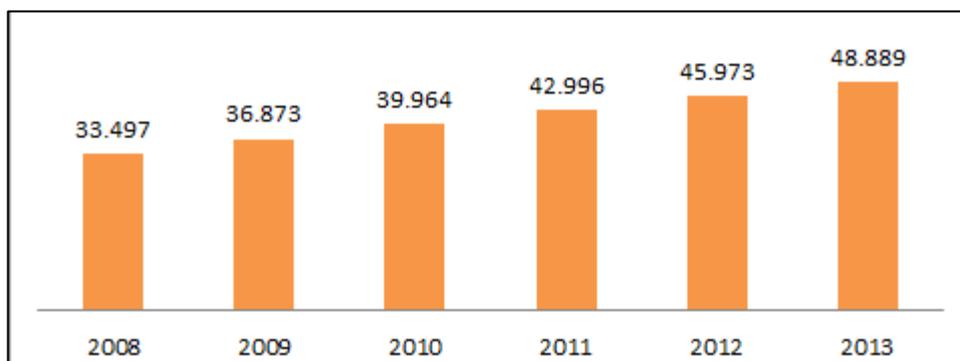


Figura 3. Cantidad de vehículos por cada 100.000 habitantes.

Fuente: Informe de calidad de vida 2013, Medellín como vamos, Área Metropolitana.

Se puede observar entre los años 2012 y 2013 el crecimiento del parque automotor, el cual fue del 7% en total. A lo largo del tiempo se han implementado nuevos modos de sistemas de transporte público para tratar de solucionar la problemática del transporte público en la ciudad, los cuales hasta hace algunos años eran suficientes, pero para la fecha ya son insuficientes para cubrir las necesidades de toda la población.

Según el programa Medellín como vamos: *“La movilidad vial es un aspecto de gran relevancia dentro del análisis de la calidad de vida de la ciudad. El aumento sostenido en el porcentaje de la población que vive en centros urbanos y el crecimiento de los procesos de conurbación que vienen aparejados, producen mayores tiempos y distancias en los desplazamientos. Idealmente, estos desplazamientos deben ser eficientes, lo que implica que deben ser rápidos, seguros y con calidad y que, además, deben minimizar los efectos sobre la contaminación ambiental, las pérdidas de productividad y los costos de oportunidad de la realización de otras actividades.”*¹

Con el fin de poder puntualizar una línea base para la implementación de una problemática del por qué sería necesario tratar este tema y que implicaciones tiene en nuestro medio, se obtiene una serie de posibles problemas o

¹ Proantioquia, Universidad EAFIT, Fundación Corona, Comfama, Comfenalco, Cámara de Comercio de Medellín, El Colombiano, Cámara de Comercio Bogotá, El Tiempo casa editorial. (2015). Medellín como vamos. Recuperado de <http://www.medellincomovamos.org/movilidad-y-espacio-p-blico> el 15-03-2015.

limitaciones que se presentan durante la elaboración y consulta sobre el sistema de transporte público, lo que por ende se hace necesaria conocerlas para luego cuantificarlas. Éstas se relacionan a continuación:

- A. Se desconoce de documentación que permita determinar la mejor alternativa de implementación de un tipo de fuente de energía, bajo condiciones de especificaciones de demanda y diseño, que pueda operar el sistema de transporte público colectivo para la ciudad de Medellín.
- B. Se desconoce la eficiencia que puedan presentar los diferentes prototipos (tamaños) sobre vías que presenten medianas y altas pendientes, como ejemplo la topografía que existe en la periferia de las comunas de Medellín.
- C. Según el Ing. Iván Sarmiento, experto en movilidad en el conversatorio sobre movilidad realizado el año 2014 en la locación de la escuela de ingenieros sede Envigado, *“se considera que para implementar algún sistema de transporte público integrado, como mínimo un usuario debe realizar dos transbordos en dos líneas de transporte distintas o dos rutas diferentes de un mismo medio, por qué dado el caso en que se presenten más de éstas, se vuelve poco atractivo el sistema y se incrementa el costo de operación teniendo una alta deserción de usuarios hacia otros medios de transporte como por ejemplo el individual, lo que reduce notablemente la posibilidad de poder alcanzar una línea de equilibrio de cualquier sistema de transporte”*.
- D. Como complemento al informe final de Medellín como vamos del 2013, se cuenta con una referencia acerca de la gran cantidad de buses que se consideran obsoletos o que según comentarios de los usuarios que utilizan dichos vehículos, ya están llegando a la culminación de su vida útil de operación, lo que incrementa los costos de mantenimiento y por ende la emisión de gases se hace cada vez en mayor volumen, debido al desgaste que presentan con el pasar del tiempo. Esto implica que se tengan otras miras con el objetivo de dar solución o mitigar de manera efectiva el problema de las emisiones de partículas al ambiente y los vehículos que actualmente operan por encima de la proyección de su vida útil.

- E. Todavía no se alcanza a concebir por qué las rutas de transporte público tienen que congestionar las vías de mayor movilidad de la ciudad en las horas pico, ya que a las personas les toca pasar un largo tiempo en las congestiones que éstas generan. Tiene relevancia el por qué circulan sobre estas vías y es por el hecho en que sobre estas se encuentra la mayor cantidad de pasajeros, pero la solución no se genera teniendo más buses para abastecer la demanda de cualquier sector, la idea sería poder cambiar de mentalidad en poder disponer de sistemas que sean más eficientes y de mayor capacidad, que brinden mayor comodidad y reduzcan los tiempos de viajes, y a su vez que sean amigables con el medio ambiente.

Teniendo en cuenta lo mencionado en el informe final del TPM (Transporte Público Medellín): *“La problemática de movilidad en el Valle de Aburra ha recibido un tratamiento permanente en los últimos años a través de una fuerte intervención en el transporte público masivo, la cual ha derivado en la institucionalidad SITVA, con el metro como eje estructurante. Sin embargo, existen aún importantes retos dada la necesidad de consolidar la integración en aspectos físicos y operativos con los alimentadores y la modernización armónica y eficiente del servicio de transporte público colectivo, propósito que configura el principal objetivo de los planes de movilidad de la actual Administración Municipal, firme en la idea de que potencializar el sistema de transporte, es impulsar el desarrollo económico y social de la región.*”

El esquema bajo el cual se ha prestado el servicio de transporte público colectivo durante más de cuarenta años en la ciudad, con muy pocas modificaciones en su estructura administrativa, financiera y operacional, arroja un diagnóstico que induce a considerar que Medellín requiere un nuevo esquema en esta materia que armonice con el ya implantado SITVA y se comporte frente a éste, como un servicio que proporcione adecuada complementariedad, garantice la total cobertura del servicio de transporte en toda la ciudad y armonice adecuadamente con el aprovechamiento del sistema integrado de transporte.”

Actualmente el servicio del transporte público colectivo de Medellín se caracteriza por:

- A. *Ausencia de estándares de calidad que permitan ejercer un control sobre su eficiencia.*

- B. *Competencia desleal y guerra del centavo, propiciada por una sobreoferta del servicio y la superposición de rutas.*
- C. *Ausente o escaso control de frecuencias que conllevan a la saturación de la malla vial.*
- D. *Débil manejo de la seguridad, con especial presencia de transporte informal que afecta la sustentabilidad del servicio colectivo y del sistema masivo de transporte.*
- E. *Altos niveles de accidentalidad, provocado por la saturación de material rodante y escaso control sobre el cumplimiento de los protocolos de mantenimiento.*
- F. *Estructura empresarial precaria, con notorio abuso de posición dominante por parte de los empresarios de transporte que torna al pequeño transportador vulnerable.*
- G. *Informalidad en el empleo especialmente en el personal de operación (contratación de conductores), con visible ausencia de programas de seguridad industrial, salud ocupacional y mínimo nivel de capacitación del personal de operación.*
- H. *Serias deficiencias en materia ambiental por falta de cumplimiento de regulaciones en materia de uso de combustibles y tecnología limpia y disposición final de sólidos y líquidos.*²

De acuerdo a lo anterior, se define la teoría en la cual nos basamos para el inicio del planteamiento del problema y ésta se centra en condiciones de operación y el impacto que genera a la sociedad, el sistema de transporte público colectivo en la ciudad de Medellín, teniendo en cuenta la demanda de usuarios y el requerimiento por los entes ambientales en el tema de cumplimiento con la emisión de contaminantes a la atmósfera. Asimismo en la ciudad se han promocionado proyectos para ayudar a mitigar la emisión de gases y el alto volumen vehicular que se presentan en las horas de máxima demanda de un día típico laboral en semana; por ejemplo se han realizado foros con temas como el siguiente: “¿por qué no nos bajamos del carro?”, donde se obtiene un gran número de respuestas que aseguran que es muy difícil cambiar la comodidad de un vehículo particular por la de una tipología de vehículos del transporte público.

Otro proyecto que se ha venido consolidando es el más conocido como “pico y placa”, el cual consta en la restricción de circulación vehicular de automóviles a

² Secretaría de Movilidad. (2014). Informe de transporte público de Medellín (TPM) – Acta de ejecución N° 2, Pág. 21 - 22.

combustión y de motos de dos tiempos durante una hora y media, donde se aplica para la jornada de la mañana y de la tarde en los siguientes horarios: 07:00 a 08:30 horas y de 17:30 a 19:00 horas, allí se presenta la mayor cantidad de vehículos circulando por la red vial principal de la ciudad.

Otro tema importante que se genera como planteamiento del problema, son los buses que se encuentran circulando en la actualidad, los cuales atienden la gran parte de la demanda de los usuarios de las diferentes comunas de la ciudad, se identifica que la gran mayoría de estos usan combustión a Diesel, lo cual generan un alto volumen de emisión de partículas contaminantes al ambiente. Debido a lo anterior ha venido ganando fuerza la implementación de algunas alternativas como fuentes de energía como lo es el sistema de gas natural vehicular (GNV), el cual se ha venido implementado en el sistema de transporte de mediana capacidad Metroplús y algunos buses que se integran al sistema Metro, conocidos como alimentadores. Estos buses, reducen en gran parte la emisión de gases a la atmosfera, generando a su vez beneficios en la salud de la población. Un tema que preocupa a la comunidad en general o que todavía es un paradigma, se trata de la eficiencia que presentan en la actualidad los buses a gas natural vehicular (GNV) como rutas alimentadoras operadas en la cuenca 6 (Comunas 1, 2, 3, 4, 8, 9 y 10) de la ciudad de Medellín, en específico para el servicio C6-022: La Cruz. Dicha zona posee una topografía con características críticas, vías con bajas especificaciones de diseños, pendientes pronunciadas y curvas muy cerradas, a su vez en la zona se evidencia congestión en las vías por parte de vehículos particulares, de cargue y descargue, el carro recolector de residuos, entre otros, lo cual aumenta la crisis de la zona y disminuye la eficiencia en la prestación del servicio.

Por lo tanto, algunas de las situaciones que se describen en los párrafos anteriores, son tomadas como planteamiento del problema y que con dicho trabajo se pretende evaluar y tener en consideración para la elaboración de la matriz multicriterio y calificación de las nuevas fuentes de energía para la implementación del sistema de transporte público colectivo en Medellín.

De acuerdo a la forma de operación de los vehículos con diferentes fuentes de energía que cuenta actualmente el sistema de transporte público en Medellín y de acuerdo a las que existen a nivel mundial, se evalúa la posibilidad de establecer parámetros y variables que ayuden a incentivar e implementar nuevas fuentes en las tipologías de vehículos que para nuestra ciudad son permitidos y

operan actualmente. Esto con el fin de poder impulsar temas de movilidad y tecnologías que sean sostenibles con el medio ambiente.

Consideramos que se hace necesario expandir las bondades de cada una de las fuentes que puedan ser implementadas en nuestra ciudad, con el fin de poder evaluarlas y compararlas con otras al mismo tiempo, ya que no se pueden parametrizar sin conocerlas ni juzgar por simple apariencia.

Una justificación que nos lleva a trabajar en este tema, es poder llegar a considerar una fuente de energía para el transporte público colectivo que pueda mejorar las condiciones de viaje de los usuarios, reducir los costos de viaje, minimizar los tiempos en los desplazamientos y generar una integración entre la infraestructura vial existente y el entorno urbano, haciendo claridad que las fuentes evaluadas puedan ser implementadas en cualquier corredor del municipio con una demanda especial.

Así pues, con el presente trabajo se pretende diseñar una metodología para analizar y comparar diferentes alternativas de fuentes de energía (eléctrico, diesel y gas) de los vehículos tipo bus requeridos para la prestación del servicio del transporte público colectivo de la ciudad de Medellín, que permita determinar la viabilidad de su implementación acorde con las condiciones topográficas de la ciudad, diseño operacional, demanda de pasajeros, costos de operación y compatibilidad con el medio ambiente.

De igual manera se fijan los siguientes objetivos específicos, en la cual se pretenden detallar durante la elaboración de este informe:

- Explicar conceptos claves que permitan integrar el contexto del trabajo con la normatividad vigente y el sistema de transporte público actual.
- Establecer variables que sean medibles, con el fin de generar parámetros que permitan realizar comparaciones entre cada una de las fuentes evaluadas.
- Elaborar un cuestionario que permita ponderar la importancia de cada una de las variables y al impacto que se genera en cada una de las fuentes que puedan ser implementadas en la ciudad de Medellín.
- Elaborar una matriz multicriterio que permita cruzar información y parámetros de cada una de las variables en la implementación de las diferentes fuentes de energía.

Para el desarrollo del proyecto se va a utilizar la investigación cuantitativa la cual consta de cuatro (4) tipos: descriptiva, analítica, experimental y cuasi-experimental. Teniendo en cuenta la información que se posee con respecto al tema de estudio, las metodologías que más se acercan a los objetivos del proyecto son la descriptiva y la analítica, ya que la información arrojada por la investigación servirá como instrumento evaluativo para el interesado.

Se llevará a cabo el método de la Investigación analítica el cual consiste en descomponer el elemento para observar las causas, naturaleza y efecto del tema estudiado. Permite a su vez conocer a fondo el tema de estudio y así se puede: explicar, hacer analogías, comprender mejor su comportamiento y establecer nuevas teorías.³

Dicha metodología se utiliza para determinar una hipótesis sobre un hecho ocurrido, predecir fallas o acontecimientos.

Basados en la metodología a implementarse en el proyecto, se tendrá en cuenta una serie de actividades para darle estructura al trabajo de investigación, las cuales se describen a continuación:

- Se recolectará la información necesaria en cuanto a normas, definiciones, tipologías de buses y posibles fuentes de energía para que el interesado en utilizar el modelo evaluativo tenga conocimiento del tema que se está desarrollando.
- Se organizará la información de manera apropiada para ayudar a los interesados en utilizar el método evaluativo creado.
- Se escogerán expertos en movilidad y transporte para determinar las variables más representativas y su ponderación en la construcción de la matriz evaluativa.
- A los expertos escogidos, se les hará entrega de un cuestionario con preguntas claras que ayuden a determinar las variables y su importancia.
- Se elaborará la matriz evaluativa y se realizará una prueba con el fin de demostrar la efectividad del método creado.

³ Usuario registrado: jhisselmmr. (2012). Investigación Analítica. Recuperado de <http://www.buenastareas.com/ensayos/Investigacion-Analitica/4498813.html> el 16-02-2015.

2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO EXISTENTE

2.1. Fuentes de energía y tipología del transporte público colectivo

De acuerdo a las formas en cómo se puede generar la energía para el impulso de los diferentes tipos de vehículos en el sistema de transporte público colectivo, se describen a continuación las distintas tecnologías que se pueden implementar de acuerdo a las que serán tenidas en cuenta en el presente trabajo.

- **Gasolina:** es un material que se obtiene mediante la destilación del petróleo, fue descubierta en 1857. Tres años más tarde, Jean Joseph Etienne Lenoir creó el primer motor de combustión interna quemando gas dentro de un cilindro, pero sólo hasta 1876 es que Nikolaus August Otto construye el primer motor a gasolina, base de los que hoy se fabrican para los automóviles modernos.

El motor a gasolina trabaja a través de la entrada del aire a los cilindros y las bujías del motor generando una chispa que combustiona y produce una explosión haciendo que la energía generada se transforme en energía mecánica. (ver *Figura 4*)

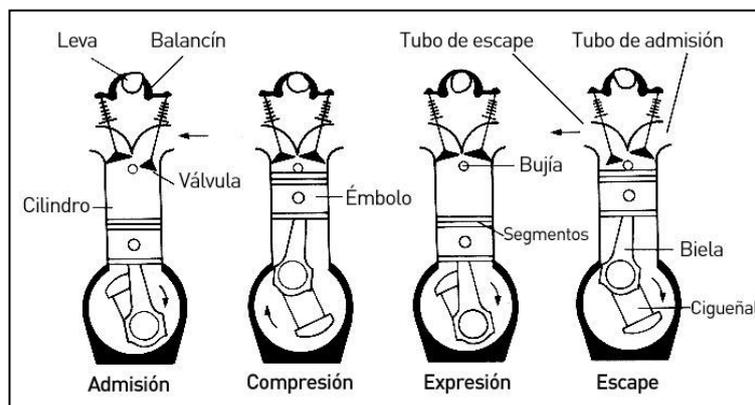


Figura 4. Proceso de combustión en el motor a gasolina.

Fuente: imagen tomada de <http://www.sura.com/blogs/autos/gasolina-diesel.cuestion.aspx>

El motor a gasolina es el más común en los automóviles colombianos gracias a las ventajas que ofrece con respecto a su funcionamiento y durabilidad. Además, posee características contaminantes con el medio

ambiente y tiene la capacidad de girar más rápido, lo que contribuye a que sea un motor muy parejo en términos de fuerza y potencia.⁴

- **Diesel:** El Diesel o ACPM (aceite o combustible para motores) fue inventado por el científico alemán Rudolph Christian Karl Diesel en 1892. Los primeros motores diseñados por éste utilizaban aceite vegetal (llamado también biodiésel) diferentes al derivado del petróleo, llamado petrodiesel.

En el motor diesel, el aire entra por las válvulas de admisión a los cilindros al igual que en un motor a gasolina. No tiene chispa (como el motor a gasolina) sino que se prende por medio de la autoignición. El combustible se inyecta en la parte superior de la cámara de combustión a gran presión desde unos orificios que presenta el inyector de forma que se atomiza y se mezcla con el aire a alta temperatura y presión (entre 700 y 900 °C). Como resultado, la mezcla se inflama muy rápidamente. Esta combustión ocasiona que el gas contenido en la cámara se expanda, impulsando el pistón hacia abajo.

El motor diésel existe tanto en el ciclo de 4 tiempos (4T - aplicaciones de vehículos terrestres por carretera como automóviles, camiones y autobuses) como de 2 tiempos (2T - grandes motores de tracción ferroviaria, de propulsión naval, y algunos camiones y autobuses en Estados Unidos).

Dentro de sus características mecánicas, el motor diesel es más pesado que su par de gasolina, porque sus elementos son mucho más grandes para lograr una relación de compresión mayor que en los motores a gasolina y requiere más esfuerzo para moverse. Está reservado para los vehículos de carga y transporte público, porque son motores que generan mayor fuerza o para motores de una potencia media.

Pero lo anterior no es definitivo. Antes, existía la creencia que los motores diésel estaban reservados exclusivamente para los autos grandes, como camiones o buses. Pero ahora, gracias a los avances de la tecnología, se pueden encontrar automóviles con este tipo de motor.

⁴ Loaiza, A. (2015). ¿Gasolina o Diesel? Recuperado de <http://www.sura.com/blogs/autos/gasolina-diesel.cuestion.aspx> el 2 de mayo de 2015.

Entre las desventajas que tiene el motor diesel es que tiene mayor capacidad de torque, pero es menos potente. También, tiene menor reacción en la aceleración. Y aunque requiere menos reparaciones que un motor a gasolina, a la hora de repararlo resulta más costoso que el anterior. Además, es definitivamente más ruidoso, a pesar de los esfuerzos por evitar esta molesta situación.

Definitivamente, las diferencias entre un motor a gasolina o diesel se acortan con el tiempo. Los avances tecnológicos hacen que su calidad y eficiencia estén a la par, lo que conduce a que cada día los autos lleven unos motores más potentes y más amigables con el medio ambiente.⁵

El proceso de combustión de esta fuente emite los siguientes contaminantes, los cuales pueden llegar a ser en diferente proporción a los comparados con otras fuentes:

- Agua H₂O: Sale en forma de vapor, no es considerado en material particulado contaminante, inocuo para el medio y el ser humano.
 - CO₂: Dióxido de carbono: respirable por el ser humano.
 - CO: Monóxido de carbono.
 - NO_x: Óxidos de Nitrógeno.
 - MP: Material Particulado.
 - HC, Hidrocarburos.
 - SO_x: Sulfuros.⁵
-
- **Gas natural:** El gas natural también se utiliza como combustible vehicular, el cual es acondicionado y comprimido para que pueda ser colocado dentro de unos cilindros especialmente fabricados y de esta manera puedan ser puestos en los vehículos.

En el sector automotriz el gas natural es empleado como combustible alternativo para los vehículos (automóviles, buses, taxis, entre otros). Actualmente, el 60% de los vehículos que tienen instalado el gas natural, son particulares y el 40% restante son públicos, dentro de los cuales se

⁵ Rodríguez, F. (2014). Gases contaminantes en los motores diésel. Recuperado de <http://www.publicamion.com.co/cursos-de-mecanica/gases-contaminantes-en-los-motores-diesel.html> el 11-05-2015.

encuentran los de transporte masivo de pasajeros y el sistema de transporte integrado del Valle de Aburrá (SITVA) para los buses padrones y articulados del Metroplús. Brinda economía y se logra hasta el 50% en cada tanqueada, a su vez se incrementa la vida útil del motor y disminuye la frecuencia del cambio de aceite.⁶

- **Eléctrico:** La red de transporte de energía eléctrica es la parte del sistema de suministro eléctrico constituida por los elementos necesarios para llevar hasta los puntos de consumo y a través de grandes distancias la energía eléctrica generada en las centrales eléctricas.

Para ello, los niveles de energía eléctrica producidos deben ser transformados, elevándose su nivel de tensión. Esto se hace considerando que para un determinado nivel de potencia a transmitir, al elevar la tensión se reduce la corriente que circulará, reduciéndose las pérdidas por efecto joule.

Con este fin se remplazan subestaciones elevadoras en las cuales dicha transformación se efectúa empleando transformadores, o bien autotransformadores. De esta manera, una red de transmisión emplea usualmente voltajes del orden de 220 Kv y superiores, denominados alta tensión, de 400 o de 500 Kv.

Parte de la red de transporte de energía eléctrica son las llamadas líneas de transporte. Una línea de transporte de energía eléctrica o línea de alta tensión es básicamente el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias. Está constituida tanto por el elemento conductor, usualmente cables de acero, cobre o aluminio, como por sus elementos de soporte, las torres de alta tensión. Generalmente se dice que los conductores "tienen vida propia" debido a que están sujetos a tracciones causadas por la combinación de agentes como el viento, la temperatura del conductor, la temperatura del viento, etc.⁷

⁶ Empresas Públicas de Medellín. (2013). Gas Natural Vehicular. Recuperado de [http://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/Clientesyusuarios/Empresas/Gasnatural/Gasnatur alvehicular.aspx](http://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/Clientesyusuarios/Empresas/Gasnatural/Gasnaturalvehicular.aspx) el 15-01-2015.

⁷ Wikipedia, (2015). Transmisión de Energía Eléctrica. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Transmisi%C3%B3n_de_energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica el 12-06-2015.

Ahora bien, de acuerdo a la fuente de energía a implementar existe una serie de prototipos o tipología de vehículos que pueden ser utilizados en un sistema de transporte público colectivo. Entendiéndose a sistema de transporte público, como el medio por el cual los ciudadanos se trasladan de un punto a otro. A continuación se presentan la mayoría de prototipos que entran en la categoría de vehículos para el sistema de transporte público colectivo:

Bus: es la denominación coloquial o informal de autobús. El autobús es un vehículo terrestre diseñado para el transporte de personas. Generalmente es usado en los servicios de transporte público urbano e interurbano y con trayecto fijo. Su capacidad puede variar entre 10 y 120 pasajeros. Este medio de transporte puede trasladar a numerosos pasajeros y por lo general tiene un recorrido fijo. Se utilizan en zona urbana, cuando el desplazamiento es muy extenso y recurrente y también para comunicar municipio y hasta países. Dentro de los buses se encuentran los siguientes:

- Trolebús: El trolebús, también conocido como trolley o trole, es un autobús eléctrico alimentado por una catenaria de dos cables superiores desde donde toma la energía eléctrica mediante dos astas. El trolebús no hace uso de vías especiales o rieles en la calzada, por lo que es un sistema más flexible. Cuenta con neumáticos de caucho en vez de ruedas de acero en rieles, como los tranvías.⁸



Figura 5. Ejemplo de Trolebús utilizado para el sistema de transporte público.

Fuente: imagen tomada de <http://desarrolloydefensa.blogspot.com/2013/01/vigencia-del-trolebus-en-el-mundo-mitos.html>

⁸ Escalona, A. (2015). El Transporte Público. Recuperado de <http://www.monografias.com/trabajos81/transporte-publico/transporte-publico2.shtml#ixzz3cPQphRAx> el 03-03-2015.

- Articulado. Como su propio nombre indica, se trata de aquel que cuenta con dos o más secciones interconectadas mediante una “articulación” que suele adquirir la apariencia de un acordeón. Suele tener una longitud de unos 18 metros y tiene la particularidad también de poder albergar un mayor número de pasajeros que los tradicionales.



Figura 6. Ejemplo de bus articulado y biarticulado utilizado para el sistema de transporte público.
Fuente: <http://masguau.com/2009/08/06/los-buses-mas-largos-del-mundo/>

- Minibús (Buseta). También es conocido por el nombre de microbús y tiene como principal seña de identidad su tamaño, que es inferior al que puede tener un bus urbano. Esa circunstancia es la que propicia que no pueda llevar a más de treinta pasajeros.



Figura 7. Ejemplo de buseta utilizada para el sistema de transporte público.
Fuente: imagen tomada de <https://www.facebook.com/pages/Aeropuerto-combuses/712819882145813>

- Midibús: Frente a los dos anteriores tipos se encuentra este otro modelo, que cuenta con un tamaño intermedio. En concreto, más exactamente se podría decir que es un poco más pequeño que uno normal y más grande que el minibús.



Figura 8. Ejemplo de midibús utilizado en el sistema de transporte público.

Fuente: imagen tomada de https://www.flickr.com/photos/augustocol_busandair/18630985078

- Autobús padrón: son buses de piso alto, que tienen por el lado izquierdo puertas al nivel de las plataformas y por el lado derecho puertas a nivel de la calle.



Figura 9. Ejemplo de Bus Padrón utilizado en el sistema de transporte público.

Fuente: imagen tomada de <http://www.primeraplana.co/wp/2014/06/mio-primer-bus-fabricado-100-en-cali/>

2.2. Transporte público en otros países

Para tener parámetros que sirvan como base y permitan a su vez evaluar el desarrollo y el tipo de transporte que tienen otros países a nivel mundial, se presentan a continuación solo algunos de los que se puede traer a colación como ejemplo para el tema en estudio:

2.2.1. Curitiba, Brasil

- Líneas rápidas (*Expresso Biarticulado*): servicios operados por autobuses de alta capacidad de tres secciones (biarticulados), que emplean las

plataformas reservadas recorriendo los cinco ejes principales que irradian del centro de la ciudad: Boqueirão, Norte, Sur, Este y Oeste. Se pueden considerar como un sistema de metro en superficie debido a su velocidad, frecuencia y capacidad. Emplean como identificador el color rojo y el acceso a los autobuses se realiza gracias a unas plataformas elevadas con forma de tubo (estaciones-tubo de las cuales en toda la RIT hay 351), adaptadas a personas con movilidad reducida. El acceso a estas marquesinas sólo se puede realizar previo pago de la tarifa y su diseño facilita enormemente la subida y bajada de viajeros.

- Líneas directas rápidas (*Ligeirao Azul*): servicios operados por autobuses que cuentan con las mismas características que el Expresso. La principal diferencia que posee es la de ofrecer un servicio más rápido al del Expresso, ya que cuenta con un menor número de paradas. Opera en los ejes estructurales desde el centro hasta Boqueirão y la Línea Verde.
- Líneas entre barrios (*Interbairros*): trayectos realizados por autobuses de color verde que unen puntos fuera del centro de la ciudad. Las líneas 1 y 2 rodean el centro, siendo la segunda de mayor radio. Las líneas de la 3 a la 6 son importantes conexiones entre algunos barrios.
- Líneas directas (*Linha Direta*): son denominados normalmente como *ônibus ligerinho* (autobús rápido) y constituyen el enlace más rápido entre dos puntos de la ciudad cubriendo largas distancias con pocas paradas. Emplean esquema de color gris plateado y conectan con las estaciones de los autobuses expresos biarticulados. La red de Curitiba fue pionera en la implantación de este tipo de servicios rápidos. Entre los servicios que prestan cabe distinguir las Radiales (Radiais) que unen el centro con los barrios, las que comunican dos puntos de la ciudad sin pasar por el centro y las Metropolitanas que unen ciudades de la Región Metropolitana de Curitiba.
- Líneas alimentadoras (*Alimentador*): son líneas de autobús locales correspondientes al esquema naranja. Unen las terminales de pasajeros con los barrios de la ciudad, proporcionando pasajeros al resto de líneas.
- Líneas circulares del centro (*Circular Centro*): líneas servidas por microbuses que dan vueltas al centro de la ciudad y son usados para ir rápidamente de un punto a otro de esta zona.

- Líneas convencionales (*Convencional*): servicios realizados por autobuses de color amarillo sin constituir una red integrada y que unen el centro de la ciudad con los barrios de forma radial. También se distinguen además de las líneas convencionales no integradas, otros servicios dentro de este tipo que unen puntos opuestos de la ciudad a los que se denominan Convencionales Radiales Integradas (*Convencionais Radiais Integradas*) o Troncales (*Troncais*).
- Interhospitalarias (*Interhospitais*): servicio desempeñado por autobuses espaciales con acceso para personas de movilidad reducida que unen los principales centros hospitalarios de la ciudad.
- Línea turística (*Linha turismo*): servicios que recorren los principales centros turísticos de la ciudad. El pago de su tarifa (R\$ 15,00) permite hasta descender y montar en el autobús cinco veces.⁹



Figura 10. Ejemplo de transporte expreso biarticulado.
Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Rede_Integrada_de_Transporte



Figura 11. Autobús híbrido (biodiesel-eléctrico) fabricado por la empresa Volvo, presta el servicio de alimentador en la RIT.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Rede_Integrada_de_Transporte

⁹ Wikipedia. (2010). Red Integrada de Transporte. Recuperada de http://es.wikipedia.org/wiki/Rede_Integrada_de_Transporte el 03-04-2015.

2.2.2. Hong Kong, China

- MTR: La estación de Hong Kong y la terminal de Airport Express están ubicadas en el corazón del centro financiero de la ciudad: Central. También se puede llegar a la estación de Kowloon mediante autobuses locales y es fácil de llegar caminar desde Jordan. En la ciudad, se provee servicios de registro y los buses que interconectan los principales hoteles en las zonas urbanas y la estación Hong Kong-Kowloon; son de cortesía para los pasajeros que viajan con Airport Express desde o hacia estas dos estaciones. Un viaje entre el aeropuerto y la estación de Hong Kong dura cerca de 24 minutos.

MTR también opera una serie de rutas locales de autobuses (la mayoría comenzando con el prefijo K) en los suburbios de los Nuevos Territorios, incluyendo la región Tuen Mun-Yuen Long y Tai Po, con el propósito de conectar las áreas locales a su red ferroviaria; se puede proveer descuentos en las tarifas para viajar en ellos con la asociación de un tren ligero o una conexión ferroviaria principal.

- Autobuses: Los autobuses en Hong Kong están franquiciados y actualmente hay cinco compañías de autobuses franquiciadas en Hong Kong. Las rutas que cruzan el puerto son operadas conjuntamente por dos franquicias de autobuses. La numeración de rutas se basa en los tipos de rutas y en los distritos donde sirven.

Las rutas de autobuses en la península de Kowloon y en los Nuevos Territorios comparten un único sistema de numeración. Sin embargo, toda la isla de Hong Kong tiene otro sistema de numeración. Las rutas correspondientes al mismo número son completamente independientes entre sí.

Las rutas de cruce de puerto y de aeropuerto usan el mismo sistema de numeración en Hong Kong. Las rutas con los prefijos 1xx, 6xx o 9xx (por ejemplo, 101, 619, 968) son de cruce de puerto, las rutas con los prefijos A o E (tales como A22 y E23) son rutas de aeropuerto.¹⁰

¹⁰ Wikimania. (2013). Transporte público en Hong Kong, China. Recuperado de http://wikimania2013.wikimedia.org/wiki/Local_transport/es el 25-04-2015.



Figura 12. Aspecto de bus de dos pisos en la ciudad de Hong Kong.
Fuente: http://wikimania2013.wikimedia.org/wiki/Local_transport/es

2.2.3. Múnich, Alemania

Autobús: Aunque el U-Bahn es lo más práctico en la mayoría de las ocasiones, Múnich cuenta con una completa red de autobuses que cubren la mayor parte de los lugares de interés de la ciudad.¹¹



Figura 13. Tipología de autobuses encontrados en Múnich.
Fuente: <http://www.disfrutamunich.com/transporte>

2.2.4. Viena, Austria

El transporte público de Viena funciona de forma bastante eficiente.

¹¹ Disfrutamunich. (2014). Transporte en Munich. Recuperado de <http://www.disfrutamunich.com/transporte> el 4-04-2015.

Autobús: Aunque por el día el metro y los tranvías son más que suficiente para moverse por Viena, por la noche los autobuses nocturnos son la única alternativa en diferencia a los taxis.¹²



Figura 14. Autobús padrón utilizado en Viena, Austria.

Fuente: <http://www.disfrutavienna.com/transporte>

2.3. Transporte público en Medellín

En Medellín se dispone de una serie de alternativas que atienden la demanda que se genera al interior del municipio y desde los otros municipios que conforman el Valle de Aburrá, asimismo genera una integración entre los mismos en diferentes medios de transporte, algunos de ellos se presentan a continuación:

Como primera instancia, Medellín cuenta con dos aeropuertos:

- El principal aeropuerto internacional que presta servicios a la ciudad es el Aeropuerto Internacional José María Córdoba, localizado fuera del Valle de Aburrá, dentro de la jurisdicción del municipio de Rionegro. Desde allí se realizan vuelos nacionales hacia las principales ciudades de Colombia, e internacionales hacia destinos en Estados Unidos, Europa, el Caribe y Centro y Sudamérica, y además conexiones con otros múltiples terminales aéreos del mundo.
- Dentro del perímetro urbano de la ciudad de Medellín está el Aeropuerto Olaya Herrera, que presta servicios de vuelos departamentales y nacionales.

¹² Disfrutavienna. (2014). Transporte público en Viena. Recuperado en <http://www.disfrutavienna.com/transporte> el 04-04-2015.

Por otro lado se cuenta con otros medios considerados como transporte urbano:

- El Metro: El metro de Medellín comenzó operaciones en 1995. Construido tanto a nivel de superficie como en viaductos elevados, cuenta además con sistemas de cables aéreos para los barrios más populares. El metro tiene varias líneas comerciales:
 - A. Línea "A", que recorre el área metropolitana de norte a sur.
 - B. Línea "B", que recorre la ciudad del centro a occidente.



Figura 15. Sistema de transporte masivo de alta capacidad METRO.

- Metrocable: Se denomina metrocable a un sistema aéreo por cable de transporte masivo, único en el mundo por su carácter, complementario al Metro de Medellín (Línea A) y que atiende las necesidades de transporte de uno de los sectores menos favorecidos de la ciudad, la comuna noroccidental. Es el único teleférico integrado con la red de transporte urbano en el mundo, dadas las condiciones topográficas de esa zona de Medellín, una de las más escarpadas de la geografía de la ciudad. Existe otro Metrocable llamado Metrocable Nuevo Occidente o Línea J, y se integra a la Línea B del Metro.



Figura 16. Sistema de transporte masivo de mediana capacidad METROCABLE.

- Metroplús: El Sistema Integrado de Transporte Masivo de Mediana Capacidad inicio operaciones en diciembre de 2011, mejoro la movilidad en la ciudad y el Área Metropolitana, permitiendo la integración física y de tarifas con el Metro, Metrocable y las rutas alimentadoras del sistema, que entraron a operar a partir de octubre del año 2013.

Metroplús en Medellín es un corredor vial de 12,5 Km, con 20 estaciones. Para mayor efectividad operativa y de demanda de pasajeros, así como de las inversiones en el Sistema, Metroplús estudió con detenimiento la extensión de la Pretronal Sur hasta la calle 30, a lo largo de la avenida El Poblado y de la avenida Guayabal, para involucrar ambos corredores dentro del Sistema Integrado de Transporte Masivo del Valle de Aburrá SITVA. Este proyecto se encuentra en la etapa de diseño.



Figura 17. Sistema de transporte masivo de mediana capacidad METROPLÚS.

- Tranvía: En 2011, el Ministerio de Transporte dio vía libre a la construcción del tranvía de Ayacucho. De 4.3 kilómetros será la longitud

que tendrá este nuevo medio de transporte y su recorrido durará unos 11 - 14 minutos. Dicho Tranvía beneficiará a la comunidad de la zona centro oriental de Medellín (comunales 8, Villa Hermosa, 9, Buenos Aires, y 10, La Candelaria), gracias al empréstito suscrito por la administración local y la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD), que fue firmado el 10 de mayo de 2005, en la alcaldía de Alonso Salazar.



Figura 18. Proyecto sistema de transporte masivo de mediana capacidad TRANVÍA DE AYACUCHO.

- Buses: La ciudad cuenta con un sistema privado de buses urbanos que atiende todas las zonas del municipio, aunque este sistema carece de una óptima planeación y proyección. La norma general actual es que todos los buses lleven al centro de la ciudad. Sin embargo, hay algunos circuitos que se apartan de esta norma, entre los que se pueden destacar el Circuito Universitario (Rutas 300 y 301), que recorre los principales centros universitarios de la ciudad, y el circuito Circular Sur, que recorre el área sur de la ciudad.

El Sistema Integrado de Transporte Masivo del Valle de Aburrá SITVA, integra algunas de las rutas de buses privados con el servicio público del metro. Mediante el SITVA, el usuario, adquiriendo un solo tiquete, puede transportarse y trasbordar entre bus, metro, metrocable y metroplús.



Figura 19. Buses urbanos y del sistema integrado de transporte.

- Taxis: Este modo de transporte se considera individual, ya que el servicio que ofrece a sus usuarios es personalizada, es decir, se realiza puerta a puerta. Actualmente en la ciudad existe un gran número de estos vehículos, matriculados en distintas empresas que prestan el servicio individual de taxis.



Figura 20. El servicio de taxis en la ciudad es muy numeroso.

- Terminales de Transporte Intermunicipal: Medellín cuenta con dos terminales de transporte intermunicipal:
 - Terminal de Transporte Intermunicipal del Norte: ubicada en la zona noroccidental de la ciudad, en el barrio Caribe. Presta servicios de autobús para las zonas situadas al oriente y al norte de Antioquia: Bogotá, Tunja, Santander, y a las principales ciudades de la Costa Norte de Colombia: Cartagena de Indias, Barranquilla, Santa Marta, Sincelejo, Montería, Magangué y otras.
 - Terminal de Transporte Intermunicipal del Sur: ubicada en la zona suroccidental de la ciudad, en el barrio Guayabal. Presta servicios

de autobús hacia el sur de Antioquia, también al Oriente antioqueño, a las principales ciudades del Eje cafetero como Manizales, Pereira y Armenia, al Departamento del Tolima y a las principales ciudades del sur de Colombia como Cali, Ibagué, Neiva, Popayán y Pasto.¹³

¹³ Wikipedia La Enciclopedia Libre. (2014). Transporte Público en Medellín. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Transporte_p%C3%BAblico_en_Medell%C3%ADn el 15-04-2015.

3. MARCO TEÓRICO

El proyecto en estudio se basa principalmente en la toma de decisiones, teniendo en cuenta que se debe decidir qué expertos serán los más apropiados para la selección de las variables y cuales servirán para dar respuesta a la pregunta del peso de cada uno de los factores que se determinen previamente.

En el libro "*Dinero y felicidad*"¹⁴, se muestra una metodología para la toma de decisiones la cual puede ser acertada para el desarrollo del proyecto, teniendo claro los pasos que se deben seguir para la toma acertada de decisiones: diagnóstico, alternativas, escenarios, riesgos, resolución y retroalimentación.

Diagnóstico: Es realizar el cuestionamiento con respecto a la importancia de los diferentes escenarios posibles para la toma de decisiones.

Alternativas: En este paso se analizan las opciones que se tienen para tomar la decisión. Por medio de este se puede determinar la mejor alternativa.

Teniendo en cuenta lo anterior, se procede a mencionar los pasos que se determinarán para el proyecto en la toma de decisiones que llevarán al desarrollo de los objetivos planteados en la Introducción del presente trabajo de grado.

Se iniciará con la recolección de la información necesaria para cumplir con el objetivo establecido. Por ende se aclara que pueden existir dos tipos de información:

- **Primaria:** Es la información obtenida desde el origen, puede ser mediante entrevistas, cuestionarios, entre otros.
- **Secundaria:** Es la información obtenida por otras personas y documentadas en un escrito o texto que puede ser consultado y verificado.

La información que se requiere para el presente proyecto es secundaria y será obtenida de la Secretaría de Movilidad, EPM, el Metro de Medellín y algunos de

¹⁴ Tovar, A. (2014) ¿Conoces una metodología para tomar decisiones eficientes? Recuperado de <http://www.elfinanciero.com.mx/opinion/conoces-una-metodologia-para-tomar-decisiones-eficientes.html> el 06-05-2015.

los proveedores de vehículos de transporte público que ofrecen las tecnologías: Diésel, gas y energía en todas sus presentaciones.

Adicional a lo anterior, se buscará y recolectará información de documentos, revistas, libros que sean de utilidad para la finalidad del trabajo de grado, los cuales pueden ser hallados en las bibliotecas universitarias. Por otro lado se realizará una búsqueda en artículos y sitios en internet, que permitan detallar información la cual se requiera actualizada.

Debido a que el tema a tratar tiene que ver con una modalidad del sistema de transporte público que existe actualmente en Colombia, se considera necesario expandir algunas de las normativas que rigen este sistema y que pueden ser de gran uso para la toma de decisiones en el proyecto. Dichas normas son mencionadas a continuación y serán ampliadas en el capítulo 4 del presente informe:

- Ley 105 de diciembre de 1993.
- Ley 336 1996 del 20 de diciembre.
- Ley 86 1989.
- Ley 310 de 1996.
- Ley 1083 del 31 de julio del 2006.
- Ley 361 de 1997, Decreto 1660 de 2003, Ley 1346 de 2009 y 1618 de 2013.
- Ley 388 de julio de 1997.
- Decreto 170 de 2001.
- Ley 1101 de 2006.
- Resolución 4350 de 1998.
- Resolución No. 7126 del 11 de octubre de 1995.

Luego de recolectar y organizar la información, se procede a la determinación de las variables con la ayuda de la asesora temática, definiendo variable como un factor, elemento o suceso que está sujeto a un cambio, es inestable e inconstante. Existen diferentes tipos de variables, pero para el caso de estudio se definen las siguientes:

- Variables cualitativas: son las que expresan distintas cualidades, características o modalidades. Dentro de estas existen las nominales (aquellas que no son numéricas y tampoco pueden ser ordenadas, como

por ejemplo el estado civil) y las ordinales o cuasi-cuantitativa (son no-numéricas pero sí permiten ser ordenadas, como la nota de los exámenes).

- Variables cuantitativas: son las que se enuncian mediante cantidades numéricas, entre otras. Las variables cuantitativas pueden ser discretas (no permite valores intermedios sino números exactos, por ejemplo la cantidad de hermanos de una persona) o continuas (aquellas que aceptan valores intermedios entre dos números, por ejemplo medidas de peso o altura).

Teniendo definidas las variables, se agruparan en grupos (factores) con el fin de simplificar los datos dentro de la matriz multicriterio. Para establecer el peso de las variables que se evaluarán en el proyecto existen varios métodos y algunos de ellos son:

Panel de Expertos:

Según la comisión europea: *“El panel de expertos puede definirse como un grupo de especialistas independientes y reputados en al menos uno de los campos concernidos por el programa que se va a evaluar, al que se reúne para que emita un juicio colectivo y consensuado sobre dicho programa. Según se les solicite, el juicio emitido puede hacer referencia a la puesta en práctica o a los efectos del conjunto o de una parte del programa.”*¹⁵

Esta metodología es utilizada principalmente cuando no se tiene documentación con respecto al tema a evaluar.

La selección de los expertos debe estar basada en la experiencia y excelente calificación que tiene cada uno con relación al tema de investigación, deben ser ajenos al proyecto para evitar que sea juez y parte y deben poseer capacidad de trabajo en equipo.

Para llegar a las conclusiones del proyecto se deben llevar a cabo varias reuniones con los expertos, las cuales debe contar con un presidente quien es el

¹⁵ Evaluation Unit Devco. (2014). Panel de Expertos. Recuperado de http://capacity4dev.ec.europa.eu/evaluation_guidelines/minisite/es-bases-metodol%C3%B3gicas-y-enfoque/herramientas-de-evaluaci%C3%B3n/panel-de-expertos el 02-02-2015.

encargado de moderar la reunión y establecer las normas de las mismas. El número de reuniones depende de la complejidad del tema de estudio.

El método DELPHI:

El método Delphi consiste en la selección de expertos en los temas de estudio, pero a diferencia de la metodología de expertos, se llega a las conclusiones mediante cuestionarios sucesivos enviados a su domicilio o sitio de trabajo, los cuales deben ser respondidos y deben ser regresados a los interesados en la investigación. El número de cuestionarios realizados depende de la complejidad del tema. El primer cuestionario corresponde a la evaluación inicial del tema y el segundo se puede enviar con las respuestas de los demás expertos consultados.

Los pasos para la adecuada elaboración de la metodología es la siguiente:

- Fase 1: formulación del problema.
- Fase 2: elección de expertos.
- Fase 3: Elaboración y lanzamiento de los cuestionarios (en paralelo con la fase 2).
- Fase 4: desarrollo práctico y exploración de resultados.

Teniendo en cuenta el alcance del proyecto, el método escogido para la selección de las variables es el método DELPHI. Se realizará la selección de varios profesionales con conocimiento en el tema de transporte y movilidad del municipio de Medellín.

Se realizará un cuestionario de al menos una pregunta, el cual será entregado o enviado a cada uno de los expertos seleccionados con anterioridad, con el fin de establecer el peso de los factores que han sido definidos, los cuales contienen las variables que ya han sido seleccionadas. Esto con el fin de desarrollar una matriz de selección de fuentes de energía y su impacto en la ciudad.

A continuación se definen los diferentes tipos de cuestionarios que se pueden utilizar para alcanzar parte del objetivo del proyecto:

- Cuestionarios abiertos: Son aquellos en los que se pregunta a la persona algo y se le deja en libertad de responder como quiera. Este tipo de

cuestionario es muy útil y proporciona mucha información, pero requiere más tiempo por parte del informante y es más difícil de analizar y codificar por parte del investigador. Generalmente, se aplican en estudios pilotos con el fin de obtener más datos.

- Cuestionarios cerrados: Están estructurados de tal manera que al informante se le ofrecen sólo determinadas alternativas de respuesta. Es más fácil de codificar y contestar. Como desventaja, podemos mencionar que las categorías que se ofrecen pueden no ser las más adecuadas, o que la persona no haya pensado sus respuestas en términos de las categorías que se le ofrecen. Otra desventaja es que, al ofrecerle categorías al informante, se le están "sugiriendo" las respuestas.

El cuestionario con respuestas cerradas, cuya definición se encuentra en el párrafo anterior, será el utilizado en el desarrollo del proyecto, teniendo en cuenta que se requieren respuestas claras y concisas para determinar el peso de los factores que han sido definidos, para la construcción del modelo evaluativo de fuentes de energía para el transporte público colectivo en Medellín.

Por otro lado se encuentra el método Delphi, que también muestra la forma de recopilar la información suministrada por cada experto, así:

“Obtención de los principales resultados: los principales estadísticos que se emplearán en el estudio serán medidas de tendencia central y dispersión: Media, mediana, moda, máximo, mínimo y desviación típica. Ello nos permite tener una visión de conjunto de los resultados obtenidos en cada una de las preguntas, aunque luego sólo se utilice como valor para la segunda vuelta la media o la mediana. La media y la mediana nos indica la tendencia central de la distribución o conjunto de respuesta de expertos, al igual que la moda. El máximo y el mínimo nos indican las respuestas extremas. La desviación nos señala el grado de dispersión en las respuestas (si más o menos los expertos se hallan en torno a las cifras de la media o no) Los cuartiles, vendrían a ayudar también en la visión del grado de dispersión de las respuestas. {El cuartil 1 (Q1), que es igual al percentil 25, sería el valor que deja el 25% de las respuestas por debajo de ella y el 75% por encima. El cuartil 3 (Q3), que es igual al percentil 75, sería el valor que deja el 75% de las respuestas por debajo de ella y el 25% por encima. Es decir entre Q1 y Q3, se situaría la mitad central de las respuestas obtenidas}. Para llevar a cabo estas tareas cualquier programa de tratamiento estadístico e

incluso una hoja de cálculo, resulta válida. Por ejemplo, el programa Excel podría valer para grabar y tener los datos registrados y también obtener las medias, medianas,... de cada una de las cuestiones planteadas en la consulta realizada a las empresas.”¹⁶

Ya teniendo la información organizada, se procede a la construcción de la matriz, teniendo en cuenta que la información recolectada es mixta, o sea cualitativa y cuantitativa.

En el medio se dispone de varias metodologías que permite ponderar los valores obtenidos en la encuesta realizada a cada uno de los expertos en movilidad, que se encuentra consignada en la metodología AHP y se describe a continuación:

Método Analytic Hierarchy Process (AHP):

“El proceso analítico jerárquico (AHP), es una metodología de análisis multicriterio desarrollada a fines de la década del 70 por el doctor en matemáticas Thomas L. Saaty. Es un método de descomposición de estructuras complejas en sus componentes, ordenando estos componentes o variables en una estructura jerárquica, donde se obtienen valores numéricos para los juicios de preferencia y, finalmente los sintetiza para determinar qué variable tiene la más alta prioridad”¹⁷

Con el anterior método, se puede evaluar que tanta cantidad de expertos prefieren cierto factor más importante que otro y su impacto en la matriz multicriterio.

¹⁶ Astigarraga, E. (2014). El Método Delphi. Recuperado de http://www.prospectiva.eu/zaharra/Metodo_delphi.pdf. el 05-05-2015.

¹⁷ Contreras, E., Pacheco, J.F. Evaluación Multicriterio para Programas y Proyectos Públicos. N° 92. 31-32. Recuperado de <http://www.dii.uchile.cl/~ceges/publicaciones/92%20ceges%20EC.pdf> el 05-04-2015.

4. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

4.1. Normatividad para el transporte público en Colombia

Para entrar a comprender y contextualizar la normatividad que rige el sistema de transporte público en Colombia, se procede a sintetizar, mediante la *Tabla 1*, algunas de las leyes, normas, decretos y resoluciones que permiten comprender la forma en cómo se estructura y se pone en operación un sistema de transporte público.

| NÚMERO | LEY - DECRETO - RESOLUCIÓN | VARIABLES O TEMAS EN CONSIDERACIÓN | ENTES REGULADORES O PARTICIPANTES |
|--|----------------------------------|--|--|
| 1 | Ley 105 de 1993 | Integración del sector y sistema general del transporte | Dirección Nacional Marítima del Ministerio de Defensa |
| | | Principios rectores del transporte | Organismos de tránsito y Transporte |
| | | Principios del transporte público | Entes que tengan funciones relacionadas con esta actividad |
| | | Regulación del transporte y el tránsito | |
| | | Sanciones | |
| | | Infraestructura del transporte | |
| | | Funciones y responsabilidades | |
| | | Recursos para la construcción y conservación de la infraestructura | |
| Planeación del transporte y la infraestructura | | | |
| 2 | Ley 336 1996 del 20 de diciembre | Estatuto Nacional de Transporte | El Estado |
| | | Creación y funcionamiento de las empresas de transporte público | Ministerio Nacional de Transporte |
| | | Prestación de servicio | |
| | | Equipos | |
| | | Servicios conexos al transporte | |
| | | Tarifas | |
| | | Seguridad | |
| 3 | Ley 86 de 1989 (Diciembre 29) | Normas sobre sistemas de servicio público | Tesorería General de la República |
| | | Financiación de los sistemas de transporte | |
| | | Autorizaciones de endeudamiento externo | |
| 4 | Ley 310 de 1996 | Modifica la ley 86 de 1989 | El Estado |
| | | Cofinanciar o participación con aportes de capital | Conpes |
| | | | Banco de Proyectos de inversión Nacional |
| 5 | Ley 1083 del 31 de julio de 2006 | Normas sobre planeación urbana sostenible | Ministerio de Minas, Energía y Protección social y de ambiente |

| | | | |
|----|--|---|---|
| | | Movilidad sostenible en distritos y municipios | Alcaldes de municipios y distritos |
| | | Disposiciones sobre gestión ambiental | Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial |
| | | Planes de Ordenamiento territorial | Ministerio de Transporte |
| 6 | Resolución 4350 de 1998 (diciembre 31) | Metodología para la elaboración de estudios de costos que sirven de base para la fijación de tarifas del transporte público | Gobierno Nacional |
| | | | Ministerio de Transporte |
| | | | Autoridades municipales, distritales y/o metropolitanas |
| 7 | Ley 1101 de 2006 (Noviembre 22) | Modifica la ley 300 de 1996 | Fondo de Promoción Turística |
| | | Ley General de Turismo | |
| | | Contribución parafiscal para la promoción y competitividad del turismo | |
| | | Impuesto al Turismo | |
| 8 | Decreto 170 de 2001 | Reglamenta el servicio de transporte terrestre automotor colectivo, metropolitano, distrital y municipal de pasajeros | Ministerio de Transporte |
| | | Ámbito de aplicación y definiciones | Alcaldes de municipios y distritos o delegados |
| | | Definición tarifaria para usuarios del transporte público | |
| 9 | Ley 361 de 1997 | Mecanismos de integración social de las personas con limitación | El Gobierno Nacional |
| | | Prevención, educación y rehabilitación | Comité consultivo |
| | | Bienestar social | Ministerios de Trabajo y seguridad social |
| | | Accesibilidad | Salud pública |
| | | Eliminación de barreras arquitectónicas | Educación Nacional |
| | | Transporte | Bienestar Familiar |
| | | Comunicación | Col deportes |
| | | Integración laboral | Las distintas administraciones |
| 10 | Ley 388 de Julio de 1997 | Modifica la ley 9 del 89 | La Nación |
| | | Modifica la ley 2 del 91 | Entidades territoriales |
| | | Ordenamiento del territorio municipal | Autoridades ambientales |
| | | Planes de ordenamiento territorial | Autoridades administrativas y de planificación |
| | | Clasificación del suelo | |
| | | Actuación urbanística | |
| | | Desarrollo y construcción prioritaria | |
| | | Adquisición de muebles por enajenación voluntaria y expropiación judicial | |
| | | Participación en la plusvalía | |
| | | Vivienda de interés social | |
| | | Licencias y sanciones | |

| | | | |
|----|---|--|--------------------------|
| | | urbanísticas y participación de la nación en el desarrollo urbano | |
| 11 | Resolución No. 7126 del 11 de Octubre de 1995 | Características y especificaciones técnicas y de seguridad que deben cumplir los vehículos automotores de transporte público colectivo de pasajeros Clasificaciones y definiciones peso bruto vehicular Dimensiones exteriores Dimensiones interiores Ensambladores e importadores Salidas de emergencia | Ministerio de transporte |
| 12 | Norma Técnica Colombiana 5206 | “Vehículos para el transporte terrestre público colectivo y especial de pasajeros.” Trata sobre los requisitos técnicos mínimos de seguridad y comodidad, en lo referente a las características generales de construcción, que deben cumplir los vehículos. | La Nación |
| 13 | Norma Técnica Colombiana 4830 | Componentes del sistema de combustible para vehículos que funcionan con gas natural comprimido. | La Nación |
| 14 | Norma Técnica Colombiana 4821 | Instalación de componentes del equipo completo para vehículos con funcionamiento dedicado GNCV o bicombustible gasolina-GNCV. | La Nación |
| 15 | Norma Técnica Colombiana 3561 | Especificaciones para tuberías flexibles no metálicas (mangueras) y conectores usados en instalaciones de artefactos a gas que utilicen GLP (fase vapor), aire con mezcla de gas propano o gas natural. | La Nación |

Tabla 1 - Normatividad para el transporte público en Colombia

4.2. Definición tarifaria para usuarios en el transporte público

La ciudad de Medellín, tratando de mantener un cobro justo para los usuarios y generando ganancia para los transportadores de pasajeros, creó la Resolución 4350 de 1998, por medio del cual se fija la metodología para la fijación de la tarifa del transporte público de la ciudad.

Los estudios se llevaron a cabo basados en la siguiente estructura de costos:

Costos variables:

- Combustible.
- Lubricantes.
- Llantas.
- Mantenimiento.
- Salarios y prestaciones.
- Servicios de estación.

Costos fijos:

- Garaje.
- Gastos de administración y rodamiento.
- Impuestos.
- Seguros.

Costos de capital:

- Recuperación de capital.
- Rentabilidad.

Para la elaboración de la metodología se tuvo en cuenta los parámetros de operación por clase de vehículo y nivel de servicio, se determina el total del parque automotor que opera dentro de la jurisdicción, se establece el vehículo o los vehículos más representativos para elaborar la estructura de costos, se determina el total de las rutas legalmente autorizadas, y se realizan encuestas en varios sitios como: estaciones de servicio, distribuidores de llantas, distribuidores de repuestos, entre otros.

Ya teniendo claro lo indicado anteriormente, se procede al cálculo de los costos de las variables, así:

Combustible:

$$\$/Km = \frac{\$/galón}{Km/galón} \quad (1)$$

$$\$/mes = \left(\frac{\$}{Km}\right) * \left(\frac{Km}{mes}\right) \quad (2)$$

$$\$/pasajero = \frac{\$/mes}{Pasajero/mes} \quad (3)$$

Lubricantes:

$$\text{Aceite motor: } \frac{\$}{Km} = \frac{\text{Valor de cada cuarto} \times \text{Número de cuartos}}{\text{Frecuencia de Cambio}} \quad (4)$$

$$\text{Aceite caja: } \frac{\$}{\text{Km}} = \frac{\text{Valor de cada cuarto} \times \text{Número de cuartos}}{\text{Frecuencia de Cambio}} \quad (5)$$

$$\text{Filtros: } \frac{\$}{\text{Km}} = \frac{\text{Valor de cada unidad} \times \text{Número de unidades}}{\text{Frecuencia de Cambio}} \quad (6)$$

El valor total \$/km por el rubro de lubricantes, se obtiene de la suma de los valores \$/km de cada ítem mencionado y el valor \$/mes resulta de multiplicar \$/km por kilómetros recorridos en el mes. A su vez, el valor \$/pasajero se obtiene dividiendo el valor mensual entre el número de pasajeros movilizados al mes.

Llantas:

$$\text{Llantas: } \frac{\$}{\text{Km}} = \frac{\text{Valor unidad} \times \text{Número de Unidades}}{\text{Frecuencia de Cambio}} \quad (7)$$

$$\text{Neumático: } \frac{\$}{\text{Km}} = \frac{\text{Valor unidad} \times \text{Número de Unidades}}{\text{Frecuencia de Cambio}} \quad (8)$$

$$\text{Protectores: } \frac{\$}{\text{Km}} = \frac{\text{Valor unidad} \times \text{Número de Unidades}}{\text{Frecuencia de Cambio}} \quad (9)$$

$$\text{Montallantas: } \frac{\$}{\text{Km}} = \frac{\text{Valor de cada servicio} \times \text{Número de servicios durante vida útil}}{\text{Frecuencia de Cambio de las llantas}} \quad (10)$$

El valor total \$/km por el rubro de llantas, se obtiene de la suma de los valores \$/km de cada ítem mencionado y el valor \$/mes resulta de multiplicar \$/km por kilómetros recorridos en el mes. A su vez, el valor \$/pasajero se obtiene dividiendo el valor mensual entre el número de pasajeros movilizados al mes.

Salario y Prestaciones:

$$\text{Salarios y prestaciones: } \frac{\$}{\text{Km}} = \frac{\text{Salario del conductor} + \text{Carga Prestacional mensual}}{\text{Kilómetros recorridos mes}} \quad (11)$$

$$\frac{\$}{\text{pasajero}} = \frac{\text{Salario del conductor} + \text{Carga Prestacional mensual}}{\text{Pasajeros recorridos mes}} \quad (12)$$

Mantenimiento:

El valor \$/km correspondiente a este rubro resulta de aplicar un modelo matemático a la matriz de mantenimiento compuesta por las partes, piezas o repuestos, frecuencia de cambio y precios de los mismos del tipo de vehículo que se está analizando.

El valor total \$/km, es la sumatoria del valor de cada repuesto sumado al valor de la mano de obra por instalación o reparación, dividido por la respectiva frecuencia de cambio.

El valor \$/mes, resulta de multiplicar el valor total \$/km por kilómetros recorridos en el mes. A su vez, el valor \$/pasajero se obtiene dividiendo el valor mensual entre el número de pasajeros movilizados al mes.

Servicios de estación:

$$\text{Lavado general: } \frac{\$}{\text{Km}} = \frac{\text{Valor de servicio}}{\text{Frecuencia del servicio expresado en Km}} \quad (13)$$

$$\text{Petrolizado: } \frac{\$}{\text{Km}} = \frac{\text{Valor de servicio}}{\text{Frecuencia del servicio expresado en Km}} \quad (14)$$

$$\text{Lavado motor: } \frac{\$}{\text{Km}} = \frac{\text{Valor de servicio}}{\text{Frecuencia del servicio expresado en Km}} \quad (15)$$

$$\text{Engrase: } \frac{\$}{\text{Km}} = \frac{\text{Valor de servicio}}{\text{Frecuencia del servicio expresado en Km}} \quad (16)$$

$$\text{Lavado parcial o aseo: } \frac{\$}{\text{Km}} = \frac{\text{Valor de servicio}}{\text{Frecuencia del servicio expresado en Km}} \quad (17)$$

El valor total \$/km por el rubro de servicios de estación, se obtiene de la suma de los valores \$/km de cada ítem mencionado y el valor \$/mes resulta de multiplicar \$/km por kilómetros recorridos en el mes. A su vez, el valor \$/pasajero se obtiene dividiendo el valor mensual entre el número de pasajeros movilizados al mes.

Costos fijos

Garaje:

$$\frac{\$}{Km} = \frac{\text{Canon mensual}}{\text{Kilómetros recorridos en el mes}} \quad (18)$$

Impuestos:

$$\frac{\$}{Km} = \frac{\text{Valor mensual}}{\text{Kilómetros recorridos en el mes}} \quad (19)$$

Administración:

$$\frac{\$}{Km} = \frac{\text{Valor mensual}}{\text{Kilómetros recorridos en el mes}} \quad (20)$$

Seguros:

El valor \$/mes para cada rubro resulta de multiplicar \$/km por kilómetros recorridos en el mes. A su vez, el valor \$/pasajero se obtiene dividiendo el valor mensual entre el número de pasajeros movilizados al mes.

Para determinar este rubro se aplica la siguiente fórmula:

$$CK \text{ anual} = (Va \times (1 + r)^n \times r) - (Vs \times r) \times (1 + r)^{n-1} \quad (21)$$

Dónde:

- CK: Costo de capital.
- Va: Valor comercial del vehículo para el año de estudio.
- n: vida útil del vehículo (20 años).
- Vs: Valor de salvamento: 30% del Va.
- r: Tasa de interés real = $1 + k - 1 + f$
- k: Tasa promedio anual de colocación
- f: Tasa promedio anual de inflación

El costo de capital anual se divide por doce (12) meses, obteniéndose así el costo mensual.

Este valor se puede presentar clasificándolo en recuperación de capital y rentabilidad, así:

$$R = Va \times 0.70 \times r$$

$$RC = CK - R$$

Dónde:

- R: Rentabilidad
- RC: Recuperación de capital

La base para la fijación de las tarifas en la jurisdicción será:

Para el caso del transporte colectivo, la sumatoria de los \$/pasajero de los costos variables, costos fijos y costos de capital.

Para el caso del transporte individual, será:

Banderazo + (valor cada x Número de caídas) o

Banderazo + (valor unidades x el número de unidades)

Dónde:

$$\text{Banderazo o arranque} = \frac{\frac{\$}{\text{Km}} \times (\text{Km recorridos al día, sin pasajeros})}{\text{Número de carreras por día}} \quad (22)$$

Para establecer el valor de cada caída o de la unidad del taxímetro se aplica siguiente fórmula: Modificado por la resolución del Ministerio de Transporte 392 de 1999.

$$\text{Valor caída o valor unidad} = \frac{\left(\frac{\$}{\text{Km}}\right) / 1000}{\text{Distancia en metros de caída o unidad}} \quad (23)$$

\$/km: sumatoria de los \$/km de los costos variables, fijos y de capital.

Para el caso de ciudades donde no se preste el servicio con taxímetro, el valor de la carrera será:

Valor del banderazo + (\$/km x distancia recorrida)

La autoridad competente podrá establecer previamente las distancias entre los principales orígenes y destinos dentro de su jurisdicción.

Los procedimientos y fórmulas mencionadas anteriormente se encuentran consignadas en la resolución 4350 de 1998 (Diciembre 31) "Por la cual se establece la metodología para la elaboración de los estudios de costos que sirven de base para la fijación de las tarifas del transporte público municipal, distrital y/o metropolitano de pasajeros y/o mixto".¹⁸

¹⁸ Ministerio de Transporte. (1998). Resolución 4350 de 1998. Recuperado en <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=25687> el 08-05-2015.

5. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS PARA EL MODELO EVALUATIVO

5.1. Definición de factores para la matriz multicriterio

Para poder llegar a mencionar los diferentes tipos de variables que se encuentran en la matriz multicriterio, se parte de unos factores fundamentales que las agrupa y caracteriza; esto con el fin de dar un orden coherente y facilitar la utilización del modelo. Los factores seleccionados para la elaboración de la matriz son:

- Ambiental.
- Rentabilidad del negocio.
- Costos de operación.

Los factores mencionados se seleccionan teniendo en cuenta la experiencia de la experta en movilidad y Líder de Programa Unidad de Planeación y Prospectiva Ingeniera Marta Suarez Gómez (Asesora temática del proyecto) debido a que son los que caracterizan el sistema de transporte público actual para la ciudad de Medellín.

Es de suma importancia que teniendo definidos aquellos factores, se explique por qué han sido seleccionados estos y no otros.

- Factor ambiental: es de aclarar que las tecnologías que tendremos en cuenta para el modelo evaluativo, son consideradas tecnologías limpias, aun así estas generan en menor proporción contaminantes al medio ambiente; dentro de los rangos permitidos y establecidos por los entes municipales y de control, se establecen unos parámetros admisibles de emisión de los mismos, por lo tanto se hace necesario implementar este componente dentro de un modelo evaluativo.

De igual manera, teniendo en cuenta el ideal de ciudad sostenible, es importante tener en cuenta el tema del medio ambiente, dado que en materia de transporte público se hace de vital importancia tener mejores expectativas de las que genera actualmente el sistema de carburación de los motores que funcionan por medio del diesel.

- Factor de rentabilidad del negocio: este factor ha sido seleccionado debido a que es de vital importancia, conocer e implementar con anterioridad un modelo financiero o una planificación estratégica de la inversión a realizar, dependiendo de las fuentes de energía que se pueden implementar para el sistema de transporte público colectivo en la ciudad. Además en este factor se asume ciertos parámetros que permiten considerar si la inversión de capital, es recuperable a n años y si la rentabilidad anual esperada se alcanza dentro de las expectativas de cualquier negocio.

- Factor costos por operación: vale la pena aclarar que dentro de este factor se incluye además el de mantenimiento. Por concepto y a criterio de algunos expertos en transporte, éste es un rubro que tiene un peso bastante importante dentro de la evaluación de cualquier modelo para el transporte. Por lo anterior, este factor gana peso dentro de sus parámetros de evaluación, ya que depende de la fuente de energía a evaluar, se obtendrán los consumos, rendimientos, desgaste de piezas y frecuencia en el cambio de las mismas, con que cada fuente competirá con otros considerando que éstas se encuentren dentro de las tecnologías limpias.

5.2. Definición de variables por factor y rangos de calificación

Con los factores ya establecidos, se procede a definir las variables con un grupo de expertos mediante una reunión sostenida entre la Ingeniera Mecánica Gladys Usuga Tamayo, el Ingeniero administrador y especialista en finanzas John Alejandro Villegas, la Ingeniera Marta mencionada anteriormente y los aspirantes al título de especialistas en vías y transporte, quienes adelantan el presente proyecto. De igual forma se acude a información consignada en la norma, la cual permite ampliar y precisar conceptos requeridos para la definición de los rangos de calificación.

De la reunión se establecen las variables que componen cada uno de los factores y estos se mencionan a continuación:

5.2.1. Factor ambiental

Para la definición de variables en este factor, se toma como la Resolución 627 de 2006, donde se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental; y la Resolución 910 de 2008, por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberían cumplir las fuentes móviles terrestres.

Por otro lado para la definición de las variables en dicho factor, se omite la emisión del gas metano (CH₄), debido a que son muchos los estudios que se han adelantado para la medición y cuantificación de dicho gas en la atmosfera, emitido por fuentes móviles; sin embargo este contaminante no ha sido regulado por alguna normatividad, lo que genera tanta controversia con los entes reguladores ambientales y los propietarios de los vehículos.

Por ende se establecen las siguientes variables:

5.2.1.1. *Emisión de ruido*

La emisión de ruido, también es considerada como fuente contaminante a la atmosfera y por ende también existe una normatividad para el control y las exigencias máximas permitidas para fuentes móviles terrestres.

De acuerdo a la normatividad se tiene la siguiente definición de la unidad de medida para dicha variable: la presión sonora se expresa en Pascales, los niveles de presión sonora se expresan en decibeles (dB). Para todas las mediciones y cálculos, la presión sonora de referencia es 20 µPa. Asimismo se tiene como parámetro dos horarios donde se presentan los valores admisibles de tolerancia de emisiones de ruido, tales como: diurno (07:01-21:00 horas) y nocturno (21:01-07:00 horas).

En la misma resolución se agrupan los sectores donde se tiene un valor mínimo de 55 dB para hospitales, bibliotecas, guarderías y hogares geriátricos; mientras que el valor máximo permitido es de 80dB y son para zonas al aire libre, tales como talleres mecánicos y parques de espectáculos. Así pues se establecen los siguientes rangos de calificación:

| | | | |
|--------------|---------|---------------|---------|
| RANGO | > 81 dB | 55 dB – 80 dB | < 54 dB |
| CALIFICACIÓN | 1 | 2 | 3 |

5.2.1.2. Emisión de Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro, no irritante pero sumamente tóxico. Se produce naturalmente por una serie de procesos, sobre todo por la oxidación parcial del metano (CH₄) que se forma en la descomposición de la materia orgánica por fermentación.

Elevadas concentraciones de este gas se generan en la atmósfera baja de centros urbanos e industriales y son originadas principalmente por la combustión incompleta de combustibles fósiles (petróleo y derivados, carbón, gas natural). En estas áreas la fuente principal de emisión de monóxido de carbono son los motores de combustión interna de los vehículos y en menor medida la actividad industrial (refinerías de petróleo, fábricas de papel, fundiciones, industria química, entre otras), la calefacción habitacional y la combustión de desperdicios.¹⁹

De acuerdo a la normatividad existente, esta variable se llega a evaluar de acuerdo a dos categorías que existen para los vehículos, estas son: los ciclos de prueba de los Estados Unidos y los ciclos de prueba de la Unión Europea; ambos emiten los valores máximos permitidos bajo prueba dinámica. Donde se obtienen los siguientes rangos de calificación:

| | | | |
|--------------|-------------|--------------------|------------|
| RANGO | > 3.12 g/km | 1 g/km – 3.11 g/km | < 0.9 g/km |
| CALIFICACIÓN | 1 | 2 | 3 |

5.2.1.3. Emisión de Hidrocarburos (HC)

Son partículas que no reaccionaron en la combustión o lo hicieron parcialmente, y es el mayor contribuyente de lo que se conoce como el SMOG de las ciudades, reconocido como altamente tóxico para la salud.²⁰

¹⁹ Braga, L. (2014). Monóxido de Carbono. Recuperado de <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/MonoxiCar.htm> el 16-05-2015.

²⁰ Wikipedia. (2014). Control de Emisiones Vehiculares. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Control_de_emisiones_vehiculares el 16-05-2015.

De acuerdo a la normatividad existente, esta variable se llega a evaluar de acuerdo a dos categorías que existen para los vehículos, estas son: los ciclos de prueba de los Estados Unidos y los ciclos de prueba de la Unión Europea; ambos emiten los valores máximos permitidos bajo prueba dinámica. Donde se obtienen los siguientes rangos de calificación:

| | | | |
|--------------|-------------|-----------------------|-------------|
| RANGO | > 0.71 g/km | 0.20 g/km – 0.70 g/km | < 0.19 g/km |
| CALIFICACIÓN | 1 | 2 | 3 |

5.2.2. Factor rentabilidad del negocio

Para este factor se evaluaron las siguientes variables:

5.2.2.1. Recuperación de capital (Inversión)

Se refiere al número de años que se tarda en recuperar la inversión realizada inicialmente. Basados en la experiencia de la secretaría de movilidad y del experto en finanzas el Ing. Alejandro Villegas, indica que:

- Se considera como rango óptimo para la recuperación de la inversión inicial un periodo comprendido entre 0 y 11 años, lo que se considera como una expectativa ideal en la inversión realizada inicialmente.
- El periodo comprendido entre los 12 y 15 años, la inversión no se considera muy óptima, pero puede ser aceptable para la recuperación del capital inicial.
- Si la inversión se recupera en un periodo mayor a 15 años, no cumple con la expectativa esperada, teniendo en cuenta que se demora mucho para lograr la recuperación de la inversión o en el caso más negativo, puede no llegar a recuperarse.

Teniendo en cuenta lo anterior, la tabla de evaluación de esta variable queda así:

| | | | |
|--------------|-----------|-------------------|------------------|
| RANGO | > 15 años | 12 años – 15 años | 0 años – 11 años |
| CALIFICACIÓN | 1 | 2 | 3 |

5.2.2.2. TIR - Tasa Interna de Retorno

La TIR se define como la rentabilidad promedio que la tasa ofrece al inversor desde el inicio hasta el final de un periodo anual promedio, se toma un porcentaje teniendo en cuenta la exigencia del mercado local de un 18% anual de la TIR para proyectos de inversión, y basados en la experiencia de los últimos tiempos en los proyectos de transporte desarrollados por la secretaría de movilidad para el área metropolitana, el porcentaje más desfavorable se considera en un 10% y el más óptimo, alcanza un valor superior al 19%, por lo tanto se parte de los anteriores porcentajes para determinar los rangos de calificación de esta variable, así:

| | | | |
|--------------|---------------|---------------|---------|
| RANGO | 10.4% - 14.9% | 15.0% - 18.0% | > 18.1% |
| CALIFICACIÓN | 1 | 2 | 3 |

5.2.3. Costos de operación

Para este factor se evaluaron las siguientes variables:

5.2.3.1. Costo de mantenimiento partes

Para determinar el rango de evaluación de esta variable, se tuvo en cuenta la experiencia de la secretaría de movilidad y el criterio del experto en finanzas Ing. Alejandro Villegas, basadas en las fuentes de energía diésel y gas natural, las cuales se tomaron como base para establecer los rangos de calificación.

Para establecer los valores por mantenimiento, la secretaría de movilidad evaluó los elementos necesarios que se requieren para el funcionamiento de cualquier tipo de vehículo, tales como:

- Aceites (Caja, motor y dirección).
- Líquido de frenos.
- Lubricante de partes.
- Filtros en general.
- Llantas y neumáticos.
- Accesorios de carretera.
- Retenedores y rodamientos.
- Frenos y accesorios de frenos.
- Elementos de suspensión.

Estos elementos, entre otros, deben ser considerados para realizar la evaluación de esta variable.

Los rangos se establecieron en base a las fuentes de energía evaluadas por la secretaría de movilidad, dando como resultado lo siguiente: el costo que representa el menor valor por mantenimiento por kilómetro es de \$ 900 lo cual se considera eficiente, el rango entre \$ 900 y \$ 1.200 se considera aceptable y mayor a \$1.200 es ineficiente, así:

| | | | |
|--------------|-----------|------------------|----------|
| RANGO | > \$ 1201 | \$ 900 - \$ 1200 | < \$ 899 |
| CALIFICACIÓN | 1 | 2 | 3 |

5.2.3.2. Costo de consumo de la fuente de energía

Teniendo en cuenta el precio actual del combustible por galón para el diésel, el valor por m³ para el gas natural, y la experiencia de la secretaría de movilidad en cuanto al rendimiento por galón y por m³ por cada kilómetro recorrido, en terreno plano:

- Diesel: El precio promedio del diésel es \$ 8.000/gal y su rendimiento son 12 km/gal.
- GNV: El precio promedio del gas es \$ 1.500/m³ y su rendimiento son 2.5 km/m³

Teniendo en cuenta las anteriores fuentes de energía se establecen como base para los siguientes rangos de calificación:

| | | | |
|--------------|----------|-----------------|---------|
| RANGO | > \$ 801 | \$ 600 - \$ 800 | < \$599 |
| CALIFICACIÓN | 1 | 2 | 3 |

6. PROCEDIMIENTO Y ELABORACIÓN DE MATRIZ MULTICRITERIO

La matriz multicriterio está basada en dos componentes los cuáles serán las fuentes de energía y los tres factores definidos en el capítulo anterior.

Como se mencionó en el capítulo 3 – Marco teórico, existen varias fuentes de energía utilizadas para generarle movimiento a los vehículos, las cuales son consideradas como tecnologías limpias para el uso del sistema de transporte público colectivo en la ciudad y se mencionan a continuación:

- Diesel.
- Gas natural.
- Eléctrico.

La fuente de energía eléctrica presenta diferentes formas de suministro a los vehículos, la cual puede ser por medio de: catenaria, batería y plataforma.

Existe otra clasificación que puede ser considerada como una fuente de energía y es la combinación de dos diferentes fuentes, siempre y cuando la tipología del vehículo pueda contener a éstas. La manera en cómo operan dos fuentes de energía dentro de un mismo vehículo se llama “sistema híbrido”.

Teniendo en cuenta la metodología DELPHI, la cual permite realizar la consulta a varios expertos en el tema, con el fin de definir el porcentaje de participación de los factores que son incluidos en la matriz multicriterio, se seleccionaron algunos expertos en transporte y movilidad los cuales se relacionan a continuación:

- Ing. Álvaro Enrique Restrepo Aramburo – Subgerente de Vías y Tránsito S.A.S.
- Ing. Gloria Natalia Jaramillo Amaya - Especialista en vías y transporte, asesora independiente.
- Ing. Iván Reinaldo Sarmiento Ordosgoitia - Director departamento Ingeniería Civil – UNAL sede Medellín.
- Ing. Liliana Sierra Figueroa - Líder de Programa Secretaría de Movilidad.
- Ing. Claudia Díaz – Líder de Transporte Metropolitano, Subdirección de Movilidad.
- Ing. Alexander Jiménez L. – Profesional uno de la gerencia de planeación del Metro de Medellín (Unal – Esp. Vías y Transporte).

- Ing. Juan Camilo Gómez González – Profesional de la gerencia de planeación de Metro de Medellín. (Esp. Vías y transporte)

A los expertos nombrados anteriormente, se les envió por medio de un correo electrónico la siguiente pregunta, con el fin de determinar los porcentajes que a su criterio y experiencia debe tener cada factor dentro del modelo evaluativo:

Dado a conocer que existen diferentes fuentes de energía, que pueden ser utilizadas en el sistema de transporte público colectivo en nuestra ciudad, (diesel, gas natural y electricidad), se pretende realizar un modelo evaluativo por medio de una matriz multicriterio, con el fin de conocer cuál sería la mejor fuente de energía bajo condiciones ideales de operación, la cual abarca en general tres (3) factores y cada uno de ellos comprende variables que lo complementan. ¿Para usted qué peso tiene cada una de ellas? Asigne y distribuya porcentualmente en la siguiente tabla, para que la sumatoria entre las tres de como resultado un 100%.

| FACTOR | PORCENTAJE |
|-----------------------------|-------------------|
| <i>Ambiental</i> | |
| <i>Inversión inicial</i> | |
| <i>Costos por operación</i> | |
| TOTAL | $\Sigma 100\%$ |

Luego de tener la respuesta de todos los expertos en transporte y movilidad, se procede a realizar el promedio porcentual de acuerdo a cada una de los factores y posteriormente con la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process) se puede establecer parámetros o bases en el calificativo de los expertos. Además se puede concluir qué factor tiene más importancia a diferencia de otros, o si dado el caso pueden llegar a tener el mismo valor en peso de acuerdo a la similitud de las respuestas de los expertos. (Ver en anexo 1 – Respuesta de expertos)

Teniendo en cuenta la respuesta de los expertos, se realizó una ponderación para determinar el porcentaje final de cada uno de los factores de la siguiente manera:

$$Prom\ Factor = \frac{Experto\ 1 + Experto\ 2 + \dots + Experto\ n}{Número\ de\ expertos} \quad (24)$$

El resultado final del promedio de cada uno de los factores, será sumado y como resultado tendrá que dar el valor de un 100%, así:

$$\Sigma \text{Factores} = \% A + \% Ii + \% Co = 100\% \quad (25)$$

Dónde:

- %A = Ambiental.
- %Ii = Inversión inicial.
- %Co = Costos por operación.

Con la respuesta de cada uno de los expertos, se presenta en la *Figura 21* la incidencia y el criterio de cada uno de ellos, a su vez permitiendo evidenciar que algunos de los factores conservan la misma asignación en valor.

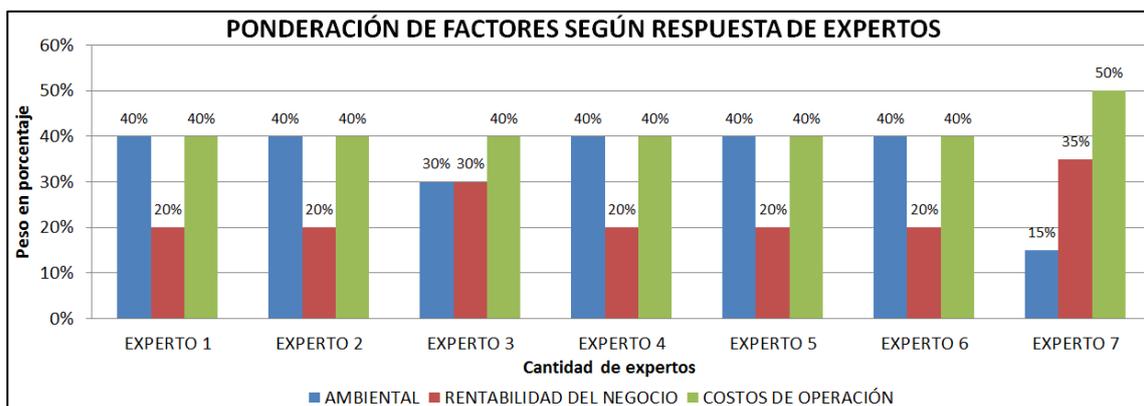


Figura 21. Ponderación de factores según la respuesta de expertos mediante la metodología DELPHI.

Si se analizan las respuestas obtenidas con las medidas de tendencia central, se evidencia que aguardan una similitud entre ellas, de manera que si adaptamos la “media” como resultado promedio entre el número de respuestas obtenidas, se obtienen así los siguientes resultados, los cuales se relacionan en la *Tabla 2*:

| MEDIDA / FACTOR | AMBIENTAL | RENTABILIDAD DEL NEGOCIO | COSTOS POR MANTENIMIENTO |
|-----------------|-----------|--------------------------|--------------------------|
| MODA | 40% | 20% | 40% |
| MEDIA | 35% | 24% | 41% |
| MEDIANA | 40% | 20% | 40% |

Tabla 2. Análisis de respuestas de expertos de acuerdo a las medidas de tendencia central.

Para establecer un rango numérico que permita medir el impacto que tiene cada una de las variables, según los parámetros obtenidos de las tablas de evaluación, se define un valor numérico de uno (1) a tres (3); este rango permitirá unificar la evaluación en la matriz teniendo en cuenta que en las tablas de evaluación se pueden encontrar valores cuantitativos y cualitativos.

De acuerdo a lo anterior se define el calificativo de los valores numéricos, así:

| VALOR NUMÉRICO | CALIFICACIÓN |
|----------------|--------------|
| 1 | Deficiente. |
| 2 | Aceptable. |
| 3 | Eficiente. |

Tabla 3 - Rango calificativo de variables.

Cada uno de los tres factores contiene una cantidad de variables, las cuales fueron mencionadas en el capítulo 5 y estas permiten expandir mejor el concepto.

De acuerdo con la reunión que se estableció entre los ingenieros para la definición de los factores y demás variables que serán evaluadas dentro de la matriz multicriterio, se define el peso y la importancia que tienen las variables dentro de cada uno de los factores. Luego el peso de cada variable se multiplica por el valor numérico (1, 2, 3) que se obtiene de los rangos valorativos de la misma y esta se repite de igual manera para las demás variables, así:

$$\text{Peso } x \text{ variable} = \% P_v \times V_v \quad (26)$$

Dónde:

- %Pv = Participación de variable.
- Vv = Valor por variable.

Con cada uno de los pesos por variable descritos en el párrafo anterior, se realiza la sumatoria de estos, los cuales arrojan el valor numérico definitivo de cada factor.

$$\Sigma \text{Variables} = \text{Variable } 1 + \text{Variable } 2 + \dots + \text{Variable } n. \quad (27)$$

El valor obtenido de la (27, se multiplica por el porcentaje del factor que las contiene, el cual ha sido definido de acuerdo al promedio de las respuestas que han dado los expertos, obteniendo como resultado el valor numérico del factor definitivo, el cual se muestra en la matriz multicriterio.

$$Total\ factor = Ponderación \times \Sigma Variables \quad (28)$$

El procedimiento mostrado anteriormente se realizará para cada uno de los factores, estos resultados se llevarán a la matriz multicriterio, y permitirá obtener el valor resultante de la fuente de energía evaluada, así:

$$Total = T f a + T f ii + T f co \quad (29)$$

Dónde:

- T f a = Total factor ambiental.
- T f ii = Total factor inversión inicial.
- T f co = Total factor costos por operación.

El anterior procedimiento se evalúa tantas veces como fuentes de energía se deseen evaluar, y la que presente un valor mayor de acuerdo a la (29 será la más apta a implementar como sistema de transporte público colectivo, bajo condiciones ideales de operación.

7. MANUAL DE PROCEDIMIENTO

Para la utilización de la matriz, se debe tener en cuenta que algunos valores no se deben modificar porque son el resultado de la investigación de este proyecto. Por lo tanto, se deben seguir los siguientes pasos para llegar al resultado:

1. En el archivo de Excel, se tienen cuatro (4) ventanas, las cuales se nombraron: matriz, parámetros, tablas y ponderación.

➤ **Matriz:** En esta ventana se encuentra el resumen de todas las fuentes de energía y los factores a evaluar para cada una de ellas.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
|----|-------------------------------------|------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | MATRIZ MULTICRITERIO | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | FUENTE DE ENERGÍA / FACTORES | AMBIENTAL | RENTABILIDAD DEL NEGOCIO | COSTOS DE OPERACIÓN | TOTAL | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | DIESEL | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | GAS NATURAL | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | ELÉCTRICO (CATENARIA) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | ELÉCTRICO (BATERÍA) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | ELÉCTRICO (PLATAFORMA) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | HÍBRIDO | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | |

Figura 22. Ventana “matriz”.

Fuente: Imagen tomada del archivo de Excel “matriz multicriterio”.

➤ **Parámetros:** En esta ventana aparece el porcentaje de cada variable y los pasos para lograr el valor resultante de cada variable y del factor que las contiene.

| PARÁMETROS DE EVALUACIÓN | | | | | DIESEL | | | |
|--------------------------|--------------------------|-------------|--|---------------|--------------------|-----------------|------------------------|--------------|
| NÚMERO | FACTOR | PONDERACIÓN | VARIABLES | PARTICIPACIÓN | VALOR POR VARIABLE | PESO X VARIABLE | SUMATORIA DE VARIABLES | TOTAL FACTOR |
| 1 | AMBIENTAL | 35% | Emisión de ruido | 30% | 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| | | | Emisión de Monóxido de Carbono (CO) | 35% | 0 | 0 | | |
| | | | Emisión de Hidrocarburos (CH) | 35% | 0 | 0 | | |
| 2 | RENTABILIDAD DEL NEGOCIO | 24% | Recuperación de capital (Inversión) / año | 50% | 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| | | | TIR - Tasa Interna de Retorno | 50% | 0 | 0 | | |
| 3 | COSTOS DE OPERACIÓN | 41% | Costo de mantenimiento partes \$/Km/Año | 40% | 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| | | | Costo de consumo de la fuente de energía \$/Km/Año | 60% | 0 | 0 | | |
| TOTAL | | 100% | | | | | | |

Figura 23. Ventana “parámetros” para la fuente diesel.
Fuente: Imagen tomada del archivo de Excel “matriz multicriterio”.

| PARÁMETROS DE EVALUACIÓN | | | | | GAS NATURAL | | | |
|--------------------------|--------------------------|-------------|--|---------------|--------------------|-----------------|------------------------|--------------|
| NÚMERO | FACTOR | PONDERACIÓN | VARIABLES | PARTICIPACIÓN | VALOR POR VARIABLE | PESO X VARIABLE | SUMATORIA DE VARIABLES | TOTAL FACTOR |
| 1 | AMBIENTAL | 35% | Emisión de ruido | 30% | 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| | | | Emisión de Monóxido de Carbono (CO) | 35% | 0 | 0 | | |
| | | | Emisión de Hidrocarburos (CH) | 35% | 0 | 0 | | |
| 2 | RENTABILIDAD DEL NEGOCIO | 24% | Recuperación de capital (Inversión) / año | 50% | 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| | | | TIR - Tasa Interna de Retorno | 50% | 0 | 0 | | |
| 3 | COSTOS DE OPERACIÓN | 41% | Costo de mantenimiento partes \$/Km/Año | 40% | 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| | | | Costo de consumo de la fuente de energía \$/Km/Año | 60% | 0 | 0 | | |
| TOTAL | | 100% | | | | | | |

Figura 24. Ventana “parámetros” para la fuente de energía gas natural (GNV).
Fuente: Imagen tomada del archivo en Excel “matriz multicriterio”.

| PARÁMETROS DE EVALUACIÓN | | | | | PARÁMETROS DE EVALUACIÓN ELÉCTRICO (CATENARIA) | | | |
|--------------------------|--------------------------|-------------|--|---------------|--|-----------------|------------------------|--------------|
| NÚMERO | FACTOR | PONDERACIÓN | VARIABLES | PARTICIPACIÓN | VALOR POR VARIABLE | PESO X VARIABLE | SUMATORIA DE VARIABLES | TOTAL FACTOR |
| 1 | AMBIENTAL | 35% | Emisión de ruido | 30% | 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| | | | Emisión de Monóxido de Carbono (CO) | 35% | 0 | 0 | | |
| | | | Emisión de Hidrocarburos (CH) | 35% | 0 | 0 | | |
| 2 | RENTABILIDAD DEL NEGOCIO | 24% | Recuperación de capital (Inversión) / año | 50% | 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| | | | TIR - Tasa Interna de Retorno | 50% | 0 | 0 | | |
| 3 | COSTOS DE OPERACIÓN | 41% | Costo de mantenimiento partes \$/Km/Año | 40% | 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| | | | Costo de consumo de la fuente de energía \$/Km/Año | 60% | 0 | 0 | | |
| TOTAL | | 100% | | | | | | |

Figura 25. Ventana “parámetros” para la fuente de energía eléctrica (catenaria).
Fuente: Imagen tomada del archivo de Excel “matriz multicriterio”.

| PARÁMETROS DE EVALUACIÓN | | | | | PARÁMETROS DE EVALUACIÓN ELÉCTRICO (BATERÍA) | | | |
|--------------------------|--------------------------|-------------|--|---------------|--|-----------------|------------------------|--------------|
| NÚMERO | FACTOR | PONDERACIÓN | VARIABLES | PARTICIPACIÓN | VALOR POR VARIABLE | PESO X VARIABLE | SUMATORIA DE VARIABLES | TOTAL FACTOR |
| 1 | AMBIENTAL | 35% | Emisión de ruido | 30% | 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| | | | Emisión de Monóxido de Carbono (CO) | 35% | 0 | 0 | | |
| | | | Emisión de Hidrocarburos (CH) | 35% | 0 | 0 | | |
| 2 | RENTABILIDAD DEL NEGOCIO | 24% | Recuperación de capital (Inversión) / año | 50% | 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| | | | TIR - Tasa Interna de Retorno | 50% | 0 | 0 | | |
| 3 | COSTOS DE OPERACIÓN | 41% | Costo de mantenimiento partes \$/Km/Año | 40% | 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| | | | Costo de consumo de la fuente de energía \$/Km/Año | 60% | 0 | 0 | | |
| TOTAL | | 100% | | | | | | |

Figura 26. Ventana “parámetros” para la fuente de energía eléctrica (batería).
Fuente: Imagen tomada del archivo de Excel “matriz multicriterio”.

| PARÁMETROS DE EVALUACIÓN | | | | |
|--------------------------|--------------------------|-------------|--|---------------|
| NÚMERO | FACTOR | PONDERACIÓN | VARIABLES | PARTICIPACIÓN |
| 1 | AMBIENTAL | 35% | Emisión de ruido | 30% |
| 5 | | | Emisión de Monóxido de Carbono (CO) | 35% |
| 6 | | | Emisión de Hidrocarburos (CH) | 35% |
| 2 | RENTABILIDAD DEL NEGOCIO | 24% | Recuperación de capital (Inversión) / año | 50% |
| 8 | | | TIR - Tasa Interna de Retorno | 50% |
| 3 | COSTOS DE OPERACIÓN | 41% | Costo de mantenimiento partes \$/Km/Año | 40% |
| 10 | | | Costo de consumo de la fuente de energía \$/Km/Año | 60% |
| TOTAL | | 100% | | |

| PARÁMETROS DE EVALUACIÓN ELÉCTRICO (PLATAFORMA) | | | |
|---|-----------------|------------------------|--------------|
| VALOR POR VARIABLE | PESO X VARIABLE | SUMATORIA DE VARIABLES | TOTAL FACTOR |
| 0 | 0 | | |
| 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| 0 | 0 | | |
| 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| 0 | 0 | | |
| 0 | 0 | 0 | 0.000 |

Figura 27. Ventana “parámetros” para la fuente de energía eléctrica (plataforma).
Fuente: Imagen tomada del archivo en Excel “matriz multicriterio”.

| PARÁMETROS DE EVALUACIÓN | | | | |
|--------------------------|--------------------------|-------------|--|---------------|
| NÚMERO | FACTOR | PONDERACIÓN | VARIABLES | PARTICIPACIÓN |
| 1 | AMBIENTAL | 35% | Emisión de ruido | 30% |
| 5 | | | Emisión de Monóxido de Carbono (CO) | 35% |
| 6 | | | Emisión de Hidrocarburos (CH) | 35% |
| 2 | RENTABILIDAD DEL NEGOCIO | 24% | Recuperación de capital (Inversión) / año | 50% |
| 8 | | | TIR - Tasa Interna de Retorno | 50% |
| 3 | COSTOS DE OPERACIÓN | 41% | Costo de mantenimiento partes \$/Km/Año | 40% |
| 10 | | | Costo de consumo de la fuente de energía \$/Km/Año | 60% |
| TOTAL | | 100% | | |

| PARÁMETROS DE EVALUACIÓN HÍBRIDO | | | |
|----------------------------------|-----------------|------------------------|--------------|
| VALOR POR VARIABLE | PESO X VARIABLE | SUMATORIA DE VARIABLES | TOTAL FACTOR |
| 0 | 0 | | |
| 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| 0 | 0 | | |
| 0 | 0 | 0 | 0.000 |
| 0 | 0 | | |
| 0 | 0 | 0 | 0.000 |

Figura 28. Ventana “parámetros” para la fuente de energía híbrido.
Fuente: Imagen tomada del archivo de Excel “matriz multicriterio”.

- Tablas: En este cuadro se puede observar los rangos que evaluarán cada variable y se verá reflejado en la matriz principal.

| TABLA DE CALIFICACIÓN POR VARIABLES DE ACUERDO A RANGOS DE CLASIFICACIÓN | | | | | | |
|--|--|--------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|--|
| AMBIENTAL | Emisión de ruido | RANGO CALIFICACIÓN | > 81 dB 1 | 55 dB - 80 dB 2 | < 54 dB 3 | DIESEL, GAS NATURAL, ELÉCTRICO (CATENARIA), ELÉCTRICO (BATERÍA), ELÉCTRICO (PLATAFORMA), HÍBRIDO |
| | Emisión de Monóxido de Carbono (CO) | RANGO CALIFICACIÓN | > 3.12 g/km 1 | 1 g/km - 3.11 g/km 2 | < 0.9 g/km 3 | DIESEL, GAS NATURAL, ELÉCTRICO (CATENARIA), ELÉCTRICO (BATERÍA), ELÉCTRICO (PLATAFORMA), HÍBRIDO |
| | Emisión de Hidrocarburos (CH) | RANGO CALIFICACIÓN | > 0.71 g/km 1 | 0.20 g/km - 0.70 g/km 2 | < 0.19 g/km 3 | DIESEL, GAS NATURAL, ELÉCTRICO (CATENARIA), ELÉCTRICO (BATERÍA), ELÉCTRICO (PLATAFORMA), HÍBRIDO |
| RENTABILIDAD DEL NEGOCIO | Recuperación de capital (Inversión) / año | RANGO CALIFICACIÓN | > 15 años 1 | 12 años - 15 años 2 | 0 años - 11 años 3 | DIESEL, GAS NATURAL, ELÉCTRICO (CATENARIA), ELÉCTRICO (BATERÍA), ELÉCTRICO (PLATAFORMA), HÍBRIDO |
| | TIR - Tasa Interna de Retorno | RANGO CALIFICACIÓN | 10.4% - 14.9% 1 | 15.0% - 18.0% 2 | > 18.1% 3 | DIESEL, GAS NATURAL, ELÉCTRICO (CATENARIA), ELÉCTRICO (BATERÍA), ELÉCTRICO (PLATAFORMA), HÍBRIDO |
| COSTOS DE OPERACIÓN | Costo de mantenimiento partes \$/km/Año | RANGO CALIFICACIÓN | > \$ 1201 1 | \$900 - \$1,200 2 | < \$ 899 3 | DIESEL, GAS NATURAL, ELÉCTRICO (CATENARIA), ELÉCTRICO (BATERÍA), ELÉCTRICO (PLATAFORMA), HÍBRIDO |
| | Costo de consumo de la fuente de energía \$/km/Año | RANGO CALIFICACIÓN | > \$ 801 1 | \$600 - \$800 2 | < \$ 599 3 | DIESEL, GAS NATURAL, ELÉCTRICO (CATENARIA), ELÉCTRICO (BATERÍA), ELÉCTRICO (PLATAFORMA), HÍBRIDO |

Figura 29. Ventana “tablas”, donde se encuentran los rangos de calificación.

Fuente: Imagen tomada del archivo de Excel “matriz multicriterio”.

- Ponderación: En esta ventana se puede observar el resultado de la encuesta realizada a cada uno de los expertos, donde se obtiene el valor promedio por factor que está enlazada con la ventana de Parámetros.

| VALOR PROMEDIO DE LOS FACTORES POR MEDIO DEL MÉTODO DELPHI | | | | | |
|--|-------------------------------------|------------|--------------------------|---------------------|-------------------|
| NÚMERO | NOMBRES Y APELLIDOS | AMBIENTAL | RENTABILIDAD DEL NEGOCIO | COSTOS DE OPERACIÓN | PONDERACIÓN TOTAL |
| 1 | ALVARO ENRIQUE RESTREPO ARAMBURRO | 40% | 20% | 40% | 100% |
| 2 | GLORIA NATALIA JARAMILLO AMAYA | 40% | 20% | 40% | 100% |
| 3 | IVAN REINALDO SARMIENTO ORDOSGOITIA | 30% | 30% | 40% | 100% |
| 4 | LILIANA SIERRA FIGUEROA | 40% | 20% | 40% | 100% |
| 5 | ALEXANDER JIMÉNEZ L. | 40% | 20% | 40% | 100% |
| 6 | JUAN CAMILO GÓMEZ GONZÁLEZ | 40% | 20% | 40% | 100% |
| 7 | CLAUDIA DIAZ | 15% | 35% | 50% | 100% |
| | | 35% | 24% | 41% | 100% |

Figura 30. Ventana “ponderación”, donde se encuentran las respuestas de los expertos.

Fuente: Imagen tomada del archivo de Excel “matriz multicriterio”.

2. En la ventana “Tablas”, aparecen los rangos que evalúan cada variable, los cuales dependen del valor esperado del comportamiento de estas ante un

modelo o algo en referencia. A cada variable se le debe dar un valor dependiendo del tipo de fuente de energía que se va a evaluar y el vehículo a ser utilizado, teniendo en cuenta las características de estos. Los rangos van desde 1 hasta 3, siendo 3 el mejor valor y 1 el peor valor. Al costado derecho de los rangos de calificación están los nombres de las diferentes fuentes de energía, los cuales se les dará el valor estimado de acuerdo al peso de cada evaluación y estos se reflejarán en la ventana “Matriz”.

3. Si se desea ver la ponderación final de la variable, se remite a la ventana “Parámetros”, donde se encuentra el resultado final de cada una de ellas.
4. La matriz permite evaluar hasta seis (6) tipos de fuentes diferentes, de las cuales se deben comparar mínimo dos (2) de ellas para lograr la finalidad del proyecto, ya que si se evalúa una sola no se podría realizar una comparación.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante el desarrollo del presente trabajo de grado, se ha llegado a las siguientes conclusiones y se generan las siguientes recomendaciones para la evaluación del modelo:

- La ciudad de Medellín viene innovando en una serie de actividades que son consideradas como alternativas, que permiten mitigar la congestión vehicular y el control de emisiones contaminantes a la atmosfera, debido al crecimiento desmedido que ha traído consigo el parque automotor. De esta manera consideramos que dichas prácticas deben ser apoyadas y fortalecidas por los entes reguladores ambientales y por la administración municipal, en respuesta a tan altas expectativas que se generan en la catalogada “ciudad más innovadora del mundo”.
- En contexto la palabra “movilidad” viene ganando auge e importancia en nuestro entorno, trayendo consigo una serie de inconvenientes en materia de infraestructura, accesibilidad, demanda y tecnologías que son utilizadas para el sistema de transporte público. En conjunto se puede apreciar como algunas fuentes presentan relación con otras, pero es de nuestro interés apreciar que todas operen en condiciones ideales a la definición que trae consigo “una movilidad sostenible”, que viene siendo la meta de una ciudad que ha venido con un alto crecimiento en el campo de la industria, el comercio y el turismo, que ha ganado un mayor posicionamiento. Es por ello, que se trata un modelo evaluativo de la operación del transporte público colectivo como variable fundamental dentro de dicho crecimiento.
- Se identifica que existen en la industria una serie de fuentes de energía que pueden suministrarle a ciertos vehículos, la capacidad de transformar dicha fuente en energía cinética, cada vez más eficientes y con mayor capacidad para transportar cada vez a más personas. Dicho principio se aplica a cualquier tipo de sistema de transporte público en el mundo. Por lo tanto se generó un criterio que permite evaluar la eficiencia y posible impacto que genera implementar alguna fuente de energía (diesel, gas natural y eléctrico) para el transporte público colectivo en nuestra ciudad. Como se pudo apreciar en la literatura, existen países que aprovechan otras fuentes diferentes a las implementadas en nuestra ciudad o de otros

tipos de vehículos, para ser un sistema más eficiente, de mayor capacidad y que reúna todas las características de sistema sostenible; es por eso que consideramos optar por evaluar tecnologías limpias que ayuden a cambiar el paradigma que se genera en el medio.

- Es de vital importancia conocer el marco legal y la legislación que rige en Colombia en materia de transporte público, ya que así es más pertinente saber las debilidades que puede presentar cualquier sistema y de ante mano se presta para proponer una posible solución. En conclusión, la normatividad que fue mencionada en el presente informe presta importancia de manera general para el marco de leyes que regulan y controlan la creación y puesta en marcha de algún sistema de transporte público y/o alguna flota de transporte a nivel nacional. Es de aclarar que no es de nuestro interés profundizar en cada una de ellas, por lo tanto es menester de la persona o entidad que haga uso de dicho informe, ampliar y consultar a fondo el manual del Ministerio de Transporte y las adecuaciones que pueda establecer la administración de planeación municipal.
- Para la implementación de cualquier fuente de energía para el sistema de transporte público colectivo en nuestra ciudad, se debe conservar y mantener la misma tarifa para los usuarios del sistema en evaluación, ya que si se encuentra por encima del valor que establece la secretaría de movilidad, sería un modelo no opcional para implementarlo, debido a que son tan altos sus costos de mantenimiento y puesta en operación, que el sistema por si solo se hace inviable para el inversionista o propietario, lo cual obliga a éste a adaptarse a la tarifa establecida. De lo contrario si esta tarifa se llega a encontrar por debajo del precio estandarizado, se podría ver beneficiado a corto plazo en la recuperación del capital inicial de inversión y las rentabilidades podrían llegar a ser más altas, debido a que los inversionistas se adaptarían a la tarifa establecida; situación que se pone en duda, debido a los altos costos de los vehículos y a la infraestructura requerida para el suministro de la fuente de energía.
- Por medio de la metodología DELPHI explicada en el capítulo 3 del presente informe, se obtiene la respuesta de varios expertos en transporte y movilidad, el peso o la ponderación de los tres factores que van dentro de la matriz multicriterio. En el *Figura 21* se representa la respuesta de

cada uno de los expertos, donde se logra apreciar la incidencia y el criterio de cada uno de ellos y a su vez permite evidenciar que algunos factores conservan la misma asignación en valor. Esto nos permite concluir que las respuestas de la mayoría de los expertos, no presentan una variación marcada que genere diferencias críticas para el modelo, por lo contrario permiten contrastar una línea de tendencia.

- De acuerdo a las medidas de tendencia central que nos permiten analizar las respuestas obtenidas por los expertos, se evidencia que guardan una similitud entre ellas y que utilizando el valor de la “media” (también conocida como promedio), se acepta estos valores para el peso que tendrán cada uno de los factores dentro de la matriz multicriterio. En la *Tabla 2* se presentan los resultados de cada una de las medidas estadísticas. Además se puede concluir que alrededor de un 76% de los expertos consultados, concuerdan con las mismas respuestas.
- Se recomienda que antes de utilizar la matriz multicriterio desarrollada en el presente informe, en la evaluación de alguna fuente de energía para el sistema de transporte público colectivo, se realice de manera anticipada un modelo financiero que permita acertar de manera efectiva el rango de calificación en el factor de rentabilidad del negocio (inversión inicial).
- Para el factor de costos por mantenimiento, en la evaluación de sus variables, se debe hacer un ajuste en el momento de realizarla, debido a que los precios que fueron utilizados para la estimación de los rangos, pueden presentar alguna variación normal en el mercado. Por lo tanto, solo sería la variable costos de consumo de la fuente que puede presentar variación, teniendo en cuenta que el precio del suministro de la fuente no es constante y varía basados en TMR (tasa de cambio representativo del mercado) y el rendimiento por recorrido permanece constante. De esta manera se recomienda hacer una actualización, si dicho precio ha generado un cambio representativo en su tarifa.
- Esta metodología que hemos desarrollado, permite considerar una fuente de energía como óptima para condiciones de operación ideal, comparándola con otra que pueda servir como base y evaluar sus beneficios con respecto a los factores de medio ambiente, inversión inicial y costos de operación.

9. BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA

Proantioquia, Universidad EAFIT, Fundación Corona, Comfama, Comfenalco, Cámara de Comercio de Medellín, El Colombiano, Cámara de Comercio Bogotá, El Tiempo casa editorial. (2015). Medellín como vamos. Recuperado de <http://www.medellincomovamos.org/movilidad-y-espacio-p-blico> el 15-03-2015.

Secretaría de Movilidad. (2014). Informe de transporte público de Medellín (TPM) – Acta de ejecución N° 2, Pág. 21 - 22.

Usuario registrado: jhisselmmr. (2012). Investigación Analítica. Recuperado de <http://www.buenastareas.com/ensayos/Investigacion-Analitica/4498813.html> el 16-02-2015.

Loaiza, A. (2015). ¿Gasolina o Diesel? Recuperado de <http://www.sura.com/blogs/autos/gasolina-diesel.cuestion.aspx> el 2 de mayo de 2015.

Rodríguez, F. (2014). Gases contaminantes en los motores diésel. Recuperado de <http://www.publicamion.com.co/cursos-de-mecanica/gases-contaminantes-en-los-motores-diesel.html> el 11-05-2015.

Empresas Públicas de Medellín. (2013). Gas Natural Vehicular. Recuperado de http://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/Clientesyusuarios/Empresas/Gasnatural/Gasnaturalvehicular.aspx el 15-01-2015.

Wikipedia, (2015). Transmisión de Energía Eléctrica. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Transmisi%C3%B3n_de_energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica el 12-06-2015.

Escalona, A. (2015). El Transporte Público. Recuperado de <http://www.monografias.com/trabajos81/transporte-publico/transporte-publico2.shtml#ixzz3cPQphRAX> el 03-03-2015.

Wikipedia. (2010). Red Integrada de Transporte. Recuperada de http://es.wikipedia.org/wiki/Rede_Integrada_de_Transporte el 03-04-2015.

- Wikimania. (2013). Transporte público en Hong Kong, China. Recuperado de http://wikimania2013.wikimedia.org/wiki/Local_transport/es el 03-04-2015.
- Disfrutamunich. (2014). Transporte en Múnich. Recuperado de <http://www.disfrutamunich.com/transporte> el 4-04-2015.
- Disfrutaviena. (2014). Transporte público en Viena. Recuperado en <http://www.disfrutaviena.com/transporte> el 04-04-2015.
- Wikipedia. (2014). Transporte Público en Medellín. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Transporte_p%C3%BAblico_en_Medell%C3%ADn el 15-04-2015.
- Tovar, A. (2014) ¿Conoces una metodología para tomar decisiones eficientes? Recuperado de <http://www.elfinanciero.com.mx/opinion/conoces-una-metodologia-para-tomar-decisiones-eficientes.html> el 06-05-2015.
- Evaluation Unit Devco. (2014). Panel de Expertos. Recuperado de http://capacity4dev.ec.europa.eu/evaluation_guidelines/minisite/es-bases-metodo%C3%B3gicas-y-enfoque/herramientas-de-evaluaci%C3%B3n/panel-de-expertos el 02-02-2015.
- Astigarraga, E. (2014). El Método Delphi. Recuperado de http://www.prospectiva.eu/zaharra/Metodo_delphi.pdf. el 05-05-2015.
- Contreras, E., Pacheco, J.F. Evaluación Multicriterio para Programas y Proyectos Públicos. N° 92. 31-32. Recuperado de <http://www.dii.uchile.cl/~ceges/publicaciones/92%20ceges%20EC.pdf> el 05-04-2015.
- Ministerio de Transporte. (1998). Resolución 4350 de 1998. Recuperado en <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=25687> el 08-05-2015
- Braga, L. (2014). Monóxido de Carbono. Recuperado de <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/MonoxiCar.htm> el 16-05-2015.

Wikipedia. (2014). Control de Emisiones Vehiculares. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Control_de_emisiones_vehiculares el 16-05-2015.

Wikipedia. (2015). Vehículo Eléctrico. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo_el%C3%A9ctrico#Energ.C3.ADa el 10-06/2015

Wikipedia. (2015). Máquina de vapor. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_vapor el 10-06-2015

Wikipedia. (2015). Gas Natural Vehicular. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Gas_natural_vehicular el 10-06-2015

ANEXO 1 – RESPUESTA DE EXPERTOS

➤ Ing. Juan Camilo Gómez

From: camigom17@gmail.com
Subject: Re: Pregunta modelo evaluativo
Date: Mon, 17 Aug 2015 09:33:39 -0500
To: daniel8920@hotmail.com

Buen día Daniel,

Te comparto mi respuesta, teniendo en cuenta que los mayores valores se asignan al factor ambiental y operación, en un contexto de planeación de largo plazo en donde la inversión inicial no debe ser un gran determinante de la selección para fuentes de energía alternativas.

| FACTOR | PORCENTAJE |
|----------------------|---------------|
| Ambiental | 40 |
| Inversión inicial | 20 |
| Costos por operación | 40 |
| TOTAL | Σ 100% |

Cordialmente,

JUAN CAMILO GÓMEZ GONZÁLEZ

➤ Ing. Alexander Jiménez

Date: Sat, 15 Aug 2015 09:54:16 -0500
Subject: Re: Pregunta modelo evaluativo
From: alexanderj1@gmail.com
To: daniel8920@hotmail.com

Hola Daniel y Vanessa,

Desde mi criterio yo asignaría los siguientes valores:

Ambiental: 40%

Inversión inicial: 20%

Costos por operación: 40%

Espero que esta información sea de ayuda para su trabajo. Nuevamente, les recuerdo que me encantaría conocer el trabajo terminado.

Saludos,

Alexander Jimenez L.

➤ Ing. Liliana Sierra

From: liliana_sierra@medellin.gov.co
To: daniel8920@hotmail.com
Subject: RE: [SPAM] Pregunta modelo evaluativo
Date: Fri, 14 Aug 2015 19:10:26 +0000

Daniel te envío mi puntuación.

De: Daniel Ceballos [mailto:daniel8920@hotmail.com]
Enviado el: viernes, 14 de agosto de 2015 12:16 p. m.
Para: Liliana Sierra Figueroa
Asunto: [SPAM] Pregunta modelo evaluativo

Buenas tardes

Dado a conocer que existen diferentes fuentes de energía, que pueden ser utilizadas en el sistema de transporte público colectivo en nuestra ciudad, (diesel, gas natural y electricidad), se pretende realizar un modelo evaluativo por medio de una matriz multicriterio, con el fin de conocer cuál sería la mejor fuente de energía bajo condiciones ideales de operación, la cual abarca en general tres (3) factores y cada uno de ellos comprende variables que lo complementan. ¿Para usted qué peso tiene cada una de ellas? Asigne y distribuya porcentualmente en la siguiente tabla, para que la sumatoria entre las tres de como resultado un 100%.

| FACTOR | PORCENTAJE |
|----------------------|------------|
| Ambiental | 40 |
| Inversión inicial | 20 |
| Costos por operación | 40 |
| TOTAL | Σ 100% |

➤ Ing. Álvaro Restrepo Aramburo.

> Date: Fri, 14 Aug 2015 14:20:30 -0500
> From: a.restrepo@viasytransito.com.co
> To: daniel8920@hotmail.com
> Subject: Re: Pregunta modelo evaluativo
>
> Daniel buenas tardes,
>
> Par mi los pesos relativos son: Ambiental 40% Inversión inicial 20% Costo de operación
40%
>
> Espero sea de utilidad mi respuesta.
> Feliz tarde.
>

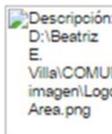
➤ Ing. Claudia Díaz.

From: claudia.diaz@metropol.gov.co
To: daniel8920@hotmail.com
Subject: RE: Pregunta modelo evaluativo
Date: Fri, 14 Aug 2015 17:22:19 +0000

Buenas tardes

Mi respuesta estaría encaminada si el diésel es con tecnología euro IV, y considerando si esto es así, tanto diésel, gas natural y electricidad son combustibles limpios

| FACTOR | PORCENTAJE |
|----------------------|------------|
| Ambiental | 15 |
| Inversión inicial | 35 |
| Costos por operación | 50 |
| TOTAL | Σ 100% |

 Descripción: **CLAUDIA DÍAZ DÍAZ**
D:\Beatriz
E.
Villa\COMUN
imagen\Logo
Area.png
Líder de Transporte Metropolitano
Subdirección de Movilidad
Conmutador 57 (4) 385 6000 Ext.611

➤ Ing. Iván Sarmiento Ordosgoitia.

Date: Fri, 14 Aug 2015 12:53:51 -0500
Subject: Re: Pregunta modelo evaluativo
From: irsarmie@unal.edu.co
To: daniel8920@hotmail.com

Ambiental 30
Inversion inicial 30
Costos de operacion 40

Ivan Sarmiento Ordosgoitia
Director depto ingenieria civil
Universidad Nacional de Colombia sede Medellin

➤ Ing. Gloria Natalia Jaramillo Amaya

From: gnjaramillo@une.net.co
To: daniel8920@hotmail.com
Subject: RE: Pregunta modelo evaluativo
Date: Fri, 14 Aug 2015 11:42:45 -0500

Hola Daniel,

Mi apreciación sobre el tema

Saludos

De: Daniel Ceballos [mailto:daniel8920@hotmail.com]
Enviado el: viernes, 14 de agosto de 2015 11:12 a. m.
Para: Gloria Natalia Jaramillo Amaya <gnjaramillo@une.net.co>
Asunto: Pregunta modelo evaluativo

Buenos días

Dado a conocer que existen diferentes fuentes de energía, que pueden ser utilizadas en el sistema de transporte público colectivo en nuestra ciudad, (diesel, gas natural y electricidad), se pretende realizar un modelo evaluativo por medio de una matriz multicriterio, con el fin de conocer cuál sería la mejor fuente de energía bajo condiciones ideales de operación, la cual abarca en general tres (3) factores y cada uno de ellos comprende variables que lo complementan. ¿Para usted qué peso tiene cada una de ellas? Asigne y distribuya porcentualmente en la siguiente tabla, para que la sumatoria entre las tres de como resultado un 100%.

| FACTOR | PORCENTAJE |
|----------------------|---------------|
| Ambiental | 40 |
| Inversión inicial | 20 |
| Costos por operación | 40 |
| TOTAL | Σ 100% |

1/22/2015

ANEXO 2 - GLOSARIO

Problema: La palabra problema abarca muchos campos o áreas donde se pueden desarrollar, y para cada uno existe una definición diferente y amplia. Para el caso de estudio se puede definir como un asunto o actividad que puede causar inconformidad en su forma de darse que puede tener una mejoría o una solución a su origen. En el ámbito social, es un inconveniente que se presenta, que al momento de darle solución beneficia a una comunidad.²²

Cuestionario: Es un conjunto de preguntas que se realizan para obtener información de un caso o tema específico para llegar a un objetivo en concreto.

Para determinar el tipo de cuestionario a utilizar, se debe tener claro el propósito de la investigación, los cuales son:

- Cuestionarios abiertos: Son aquellos en los que se pregunta al sujeto algo y se le deja en libertad de responder como quiera. Este tipo de cuestionario es muy útil y proporciona mucha información, pero requiere más tiempo por parte del informante y es más difícil de analizar y codificar por parte del investigador. Generalmente, se aplican en estudios pilotos con el fin de obtener más datos.²³
- Cuestionarios cerrados: Están estructurados de tal manera que al informante se le ofrecen sólo determinadas alternativas de respuesta. Es más fácil de codificar y contestar. Como desventaja, podemos mencionar que las categorías que se ofrecen pueden no ser las más adecuadas, o que la persona no haya pensado sus respuestas en términos de las categorías que se le ofrecen. Otra desventaja es que, al ofrecerle categorías al informante, se le están "sugiriendo" las respuestas.²³

Variables: Esta palabra se refiere a algo que tiene o presenta algún cambio, se caracteriza por ser inconstante, inestable y mudable; es una propiedad que varía con respecto a otras características en estudio. Existen diferentes tipos de variables, pero para el caso de estudio se definen las siguientes:

²² Definición.de. (2015). Problema. Recuperado de <http://definicion.de/problema/> el 10-06-2015

²³ Definición.de. (2015). Cuestionario. Recuperado de <http://definicion.de/cuestionario/> el 10-06/2015

- Variables cualitativas: son las que expresan distintas cualidades, características o modalidades. Dentro de estas existen las nominales (aquellas que no son numéricas y tampoco pueden ser ordenadas, como por ejemplo el estado civil) y las ordinales o cuasi-cuantitativa (son no-numéricas pero sí permiten ser ordenadas, como la nota de los exámenes).²⁴
- Variables cuantitativas: son las que se enuncian mediante cantidades numéricas, entre otras. Las variables cuantitativas pueden ser discretas (no permite valores intermedios sino números exactos, por ejemplo la cantidad de hermanos de una persona) o continuas (aquellas que aceptan valores intermedios entre dos números, por ejemplo medidas de peso o altura).²⁴

Tipos de tecnología para el transporte: Son los posibles medios tecnológicos en los cuales se basa un tipo de sistema de transporte, para poder llevar a cabo su funcionamiento. Algunos de ellos se describen a continuación:

- Diesel: Es un hidrocarburo líquido que es utilizado como combustible para hacer marchar vehículos con motores diésel. Los diferentes tipos de vehículos que pueden operar con combustión Diesel son: automóvil, trenes, autobuses y algunos camiones.
- Eléctricos: Este sistema obtiene la tracción de los motores eléctricos para poner en marcha un vehículo y la energía puede ser suministrada de las siguientes maneras:
 - Alimentación externa del vehículo durante todo su recorrido, con un aporte constante de energía, como es común en el tren eléctrico y el trolebús.
 - Energía proporcionada al vehículo en forma de un producto químico almacenado en el vehículo que, mediante una reacción química producida a bordo, produce la electricidad para los motores eléctricos. Ejemplo de esto es el coche híbrido no enchufable, o cualquier vehículo con pila de combustible.

²⁴ Definición.de. (2015). Variable. Recuperado de <http://definicion.de/variable/> el 10-06-2015

- Energía generada a bordo usando energía nuclear, como son el submarino y el portaaviones nuclear.
- Energía generada a bordo usando energía solar generada con placas fotovoltaicas, que es un método no contaminante durante la producción eléctrica, mientras que los otros métodos descritos dependen de si la energía que consumen proviene de fuentes renovables para poder decir si son o no contaminantes.
- Energía eléctrica suministrada al vehículo cuando está parado, que es almacenada a bordo con sistemas recargables, y que luego consumen durante su desplazamiento.²⁵

Los diferentes tipos de vehículos que pueden funcionar con energía son: automóvil, trenes, autobuses, trolebuses y tranvías.

- Vapor: Es un motor de combustión externa que transforma la energía térmica de una cantidad de agua en energía mecánica.²⁶ Fue utilizado principalmente en trenes, pero también se crearon automóviles a vapor, casi en la misma época que fue creado el motor diesel.
- Gas Natural Vehicular: Se denomina Gas Natural Vehicular (GNV), a la utilización del gas natural como combustible para vehículos. Puede utilizarse tanto en estado líquido (GNL) como gaseoso (comprimido, GNC).
 - Gas Natural Licuado (GNL): es gas natural que ha sido procesado para ser transportado y almacenado en fase líquida a presión atmosférica y a 160°C aproximadamente.
 - Gas Natural Comprimido (GNC): es gas natural almacenado y transportado a altas presiones, habitualmente entre 200 y 250 bar. Se utiliza como combustible para uso vehicular.²⁷

²⁵ Wikipedia. (2015). Vehículo Eléctrico. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo_el%C3%A9ctrico#Energ.C3.ADa el 10-06/2015

²⁶ Wikipedia. (2015). Máquina de vapor. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_vapor el 10-06-2015

²⁷ Wikipedia. (2015). Gas Natural Vehicular. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Gas_natural_vehicular el 10-06-2015

Este fluido permite poner en marcha algunos vehículos con motores a gas natural, como lo son: automóviles, tranvías, metros, buses y trolebús.

Criterios de calificación: La calificación se puede definir como un criterio que se le asigna a una determinada variable, que permite ser objeto de evaluación para su respectiva clasificación; lo cual genera un rango de aceptabilidad entre otras variables a estudiar.

Existen varios tipos de calificación, pero para el objeto del proyecto en estudio se definen las siguientes:

- **Calificación cuantitativa:** Este tipo de calificación es medida en una escala numérica, que permite ser procesada para luego elaborar una tabulación de los resultados obtenidos al evaluar cada variable, lo que reconoce claramente un rango de aceptabilidad entre las mismas.
- **Calificación cualitativa:** Este tipo de calificación se mide evaluando las características de cada variable, mostrando un resultado que clasifique las cualidades de cada una de las variables evaluadas.