



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Eficiencia energética en la administración de flotas vehiculares. Caso buses del Metro de Medellín**

**Luis Andrés Sanín Gallón**

Universidad Nacional de Colombia  
Sede Medellín, Facultad de Minas  
Medellín, Colombia

2016

# **Eficiencia energética en la administración de flotas vehiculares. Caso buses del Metro de Medellín**

**Luis Andrés Sanín Gallón**

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en ingeniería, Ingeniería Administrativa**

Director (a):  
Sergio Botero Botero, D. Sc.

Línea de Profundización:  
Gestión

Universidad Nacional de Colombia  
Sede Medellín, Facultad de Minas  
Medellín, Colombia

2016

La educación no solo enriquece la cultura... Es la primera condición para la libertad, la democracia y el desarrollo sostenible.

Kofi Annan.

# Agradecimientos

A mi madre Gloria Gallón porque su apoyo moral y compañía ha sido la fortaleza que he necesitado para cumplir las metas que me he propuesto, a mi padre Rodrigo Sanín que por su sabiduría y conocimiento ha logrado orientar mi formación profesional y enseñarme a formular con objetividad un proyecto de vida, a mi nana Carmen Acevedo que con su ayuda hemos podido llevar la vida con menos preocupaciones; a todos ellos porque cada día me impulsan a ser mejor y crecer como persona.

Gracias a la Universidad Nacional de Colombia por brindarme las oportunidades y la formación que ahora tengo, su lucha para mejorar y atraer más personas debe ser incesable, solo así podemos lograr un país con paz y desarrollo sostenible.

Gracias a los profesores Sergio Botero y Henry Laniado por su acompañamiento y dedicación para cumplir de la mejor manera los objetivos que nos planteamos en este trabajo de grado, esperamos sea un aporte al desarrollo del sector transporte.

## Resumen

En este trabajo se propone a la empresa Metro de Medellín un sistema de gestión de la energía para sus buses BRT (en inglés Bus Rapid Transit) enfocado a optimizar el consumo de combustible, el cual se ha desarrollado bajo el ciclo de mejora continua P-H-V-A que incluye diversos parámetros que establece la norma ISO 50001 tales como el planteamiento de objetivos energéticos, caracterización energética de la flota, plan de acción y evaluación de indicadores sobre eficiencia energética. Trazado este horizonte se han realizado pruebas de ruta en vehículos durante la prestación del servicio comercial para obtener datos sobre las variables asociadas a su funcionamiento mediante el uso de softwares de diagnóstico, además de una recopilación de otros datos acerca de su operación tomados de las diferentes áreas administrativas de esta empresa.

Posteriormente se estructuran bases de datos que luego son procesadas mediante una metodología de análisis multivariante de datos, la cual permite dar información sobre el comportamiento e importancia que tiene cada variable respecto al consumo de combustible y de esta manera simplificar el número de variables que serán objeto de estudio para el sistema de gestión de la energía.

Finalmente, el sistema de gestión de la energía basa el desarrollo de su ciclo P-H-V-A sobre aquellas variables que son influyentes para el consumo de combustible de los buses, con lo que se busca que un plan de acción pueda ser estructurado de manera concreta y efectiva, y sobre todo que permita el cumplimiento de los objetivos que se plantean.

**Palabras clave:** Eficiencia energética, administración de energía, administración de flotas, estadística multivariante.

## Abstract

This work proposes to the company Metro de Medellín an energy management system for its BRT buses focused on optimizing fuel consumption, which has been developed under the continuous improvement cycle PHVA which includes various parameters established by the standard ISO 50001 such as energy targets, fleet energy characterization, action plan and evaluation of energy efficiency indicators. Traced to this horizon, vehicle route tests were performed during the commercial service to obtain data on the variables associated with its operation through the use of diagnostic software, as well as a compilation of other data about its operation taken from the different Administrative areas of this company.

Subsequently, data bases are structured and then processed using a multivariate data analysis methodology, which allows information on the behavior and importance of each variable with respect to fuel consumption and thus simplify the number of variables that will be object for the energy management system.

Finally, the energy management system bases the development of its P-H-V-A cycle on those variables that are influential for the fuel consumption of the buses. This means that an action plan can be structured in a concrete and effective way, and above all that allows the fulfillment of the objectives that are proposed.

**Keywords:** Energy efficiency, energy management, Fleet management, Multivariate statistics.

# Contenido

Resumen .....	III
Contenido .....	V
Lista de figuras.....	VIII
Lista de tablas.....	X
Lista de anexos.....	XII
Lista de símbolos, siglas y abreviaturas .....	XIII
Introducción .....	1
Marco teórico .....	7
1.1    Gestión de la energía .....	7
1.2    Norma ISO 50001: 2011.....	9
1.3    Gestión de flotas .....	11
1.3.1    Mantenimiento de los vehículos .....	13
1.3.2    Capacitación a conductores .....	15
1.3.3    Uso de tecnologías más eficientes y menos contaminantes.....	16
1.3.4    Gestión de operaciones.....	17
1.3.5    Sistemas de información .....	19
1.4    Análisis multivariante de datos .....	20
Estado del arte.....	24
2.1    Evaluación sobre el uso de las flotas de transporte público BRT.....	25
2.2    Impactos sobre la emisión de gases de efecto invernadero .....	28

---

2.3	Impactos sobre el consumo de combustible .....	31
	Contextualización.....	35
3.1	Medellín y su sistema multimodal .....	39
3.1.1	Sistema BRT de Medellín.....	40
3.2	Bucaramanga.....	41
3.3	Barranquilla.....	42
3.4	Pereira .....	43
3.5	Cali.....	44
3.6	Bogotá.....	45
	Caracterización del sistema BRT de Medellín .....	36
4.1	Características técnicas de los buses y la ruta .....	36
4.2	Programas de gestión .....	48
4.2.1	Programa de gestión de los conductores .....	49
4.2.2	Programa de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo .....	50
4.2.3	Programación de la operación.....	57
4.3	Demanda del servicio.....	59
	Propuesta del sistema de gestión de la energía (SGE).....	63
5.1	Planificación energética.....	64
5.1.1	Revisión energética.....	64
5.1.2	Línea base .....	70
5.1.3	Objetivos energéticos.....	72
5.1.4	Indicadores de desempeño energético.....	73
5.1.5	Plan de acción.....	79
5.1.5.1	Estructuración de las bases de datos .....	79
5.1.5.2	Análisis multivariante de los datos .....	82
5.1.6	Recomendaciones para las actividades del plan de acción .....	93
5.1.6.1	Conducción .....	93



---

5.1.6.2	Logística.....	97
5.1.6.3	Funcionamiento.....	98
5.2	Implementación y operación.....	99
5.3	Verificación.....	100
5.4	Revisión de la alta dirección.....	102
Conclusiones y recomendaciones.....		63
6.1	Conclusiones.....	63
6.2	Recomendaciones.....	101
Anexos.....		101
Bibliografía.....		101

## Lista de figuras

Figura 1: Ciclo de mejoramiento continuo P-H-V-A. Peirano (2012).....	10
Figura 2: Relación entre el consumo específico de combustible por carga transportada qt(L/100tkm) y el factor de carga ( $\gamma$ ). (Fuente: Vujanovic et al., 2010).....	33
Figura 3: Espectro de calidad sobre el transporte público sobre llantas. (Fuente: ITDP (Institute for Transportation & Development), 2010). ....	38
Figura 4: Mapa del SITM de Medellín. ....	41
Figura 5: Mapa del SITM de Bucaramanga.....	42
Figura 6: Mapa del SITM de Barranquilla. ....	43
Figura 7: Mapa del SITM de Pereira. ....	44
Figura 8: Mapa del SITM de Cali.....	45
Figura 9: Mapa del SITM de Bogotá.....	46
Figura 10: Indicadores de confiabilidad de la flota.....	52
Figura 11: Indicadores de confiabilidad Articulados. ....	53
Figura 12: Indicadores de confiabilidad Padrones. ....	53
Figura 13: Indicadores de disponibilidad de la flota 2015. ....	56
Figura 14: Indicadores de disponibilidad de los buses Articulados y Padrones 2015. ....	57
Figura 15: Personas transportadas mensualmente por el sistema. ....	59
Figura 16: Promedio de kilómetros recorridos diariamente Articulado y Padrón.....	61
Figura 17: Consumo de combustible mensual de la flota por tipo de bus. ....	65
Figura 18: Comparación Rendimiento Vs Combustible por pasajero.....	66
Figura 19: Comparación Combustible por pasajero Vs Pasajeros transportados. ....	67
Figura 20: Autonomía por tipo de bus. ....	69
Figura 21: Producción (Personas transportadas) Vs Consumo de energía (Combustible consumido). ....	71
Figura 22: Línea meta de combustible estimada (roja) en un gráfico de dispersión de consumo de combustible frente a personas transportadas.....	73

---

Figura 23: Variación del Indicador de consumo (IC) respecto a las personas transportadas por mes.....	74
Figura 24: Indicador de eficiencia base 100. ....	75
Figura 25: Indicador gráfico de tendencia o sumas acumulativas CUSUM (izquierda Articulado, derecha Padrón). ....	78

## Lista de tablas

Tabla 1: Clasificación de los numerales de la norma ISO 50001 en el ciclo P-H-V-A.....	11
Tabla 2: Principales características técnicas de los buses Articulado BLK, Articulado ZT y Padrón.....	47
Tabla 3: Indicadores de desempeño utilizados para los BOP y maniobristas.....	50
Tabla 4: Sistemas que componen la flota de buses.....	54
Tabla 5: Distribución de los buses en las líneas L1 y L2 durante hora pico.....	58
Tabla 6: Oferta actual del servicio de transporte.....	58
Tabla 7: Personas movilizadas por línea.....	60
Tabla 8: Determinación de los volúmenes de gas almacenados en los tanques por bus.....	68
Tabla 9: Variables de la Línea CAN del vehículo.....	80
Tabla 10: Variables de Conducción.....	81
Tabla 11: Detección de outliers en datos obtenidos de la Línea CAN del vehículo.....	84
Tabla 12: Detección de outliers en datos obtenidos por Conducción.....	84
Tabla 13: Número de condición de la matriz de correlaciones original.....	86
Tabla 14: Variables de la Línea CAN con mayor correlación.....	86
Tabla 15: Número de condición de la matriz de correlaciones corregido.....	88
Tabla 16: Estimación de los coeficientes $\beta$ y bondad del ajuste para la Línea CAN excluyendo variables con multicolinealidad.....	88
Tabla 17: Estimación de los coeficientes $\beta$ y bondad del ajuste incluyendo todas las variables tomadas por Conducción.....	89
Tabla 18: Modelos de regresión lineal excluyendo variables por multicolinealidad.....	89
Tabla 19: Estimación de los coeficientes $\beta$ y bondad del ajuste de las variables significativas para la Línea CAN.....	91
Tabla 20: Estimación de los coeficientes $\beta$ y bondad del ajuste de las variables significativas para la Conducción.....	92

---

Tabla 21: Modelos de regresión lineal excluyendo variables por backward stepwise regression. .....	92
Tabla 22: Asignación de variables de acuerdo a su rol en el bus. ....	93
Tabla 23: Valores base y objetivo para las variables de Línea CAN.....	101
Tabla 24: Valores base y objetivo para las variables de Conducción. ....	102

## Lista de anexos

Anexo 1: Recapitulación de la literatura relacionada a los sistemas de transporte.....	101
Anexo 2: Parámetros descriptivos de las variables significativas para el consumo de combustible en articulado. ....	101
Anexo 3: Parámetros descriptivos de las variables significativas para el consumo de combustible en articulado. ....	103
Anexo 4: Curvas de desempeño para los motores ISLG 320HP, ISLG 280HP y GL11K 340HP. ....	105

## Lista de símbolos, siglas y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Significado	Unidad SI	Definición
$a$	Vector discriminante de Fisher		Ecn. 3
$d_j$	Dirección $j$ con norma unidad maximiza o minimiza el coeficiente de kurtosis univariante de los datos proyectados		Ecn. 15
$d_j'$	Transpuesta de $d_j$		Ecn. 15
$E$	Energía de producción (combustible consumido mensualmente)	[m3]	Ecn. 8
$E_{medida}$	Consumo de combustible mensual medido	[m3]	DF
$E_{nap}$	Carga base de combustible para el sistema	[m3]	Ecn. 8
$E_{tendencia}$	Consumo de combustible mensual proyectado	[m3]	Ecn. 8
$G$	Número de grupos para la Ecn. 2	[und]	DF
$J$	Número de variables para la Ecn. 2	[und]	DF
$H_0$	Hipótesis nula		$\beta_i = 0$
$H_1$	Hipótesis alternativa		$\beta_i \neq 0$
IC	Indicador de consumo de energía		Ecn. 10
$k$	Kurtosis o apuntalamiento		Ecn. 15
L1	Ruta línea 1		Figura 4
L2	Ruta línea 2		Figura 4
$m$	Pendiente de Producción (P) Vs Energía de producción (E)	[m3/und]	Ecn. 8
$m$	Condición del discriminante de Fisher		Ecn. 4
$n$	Número de datos	[und]	DF
$n_1$	Número de individuos en el grupo 1	[und]	DF
$n_2$	Número de individuos en el grupo 2	[und]	DF
$P$	Presión de los neumáticos	[kPa]	DF

P	Producción (personas transportadas mensualmente)	[und]	Ecn. 8
$P_{atm}$	Presión atmosférica promedio en la ciudad de Medellín	kPa	DF
$P_T$	Presión máxima admitida en los tanques de gas (para los cálculos se resta el valor de la reserva)	kPa	DF
$P_{valor}$	Nivel de significancia obtenido	[%]	DF
q	Consumo específico de combustible	[l/100km]	$\frac{\text{Combustible consumido}}{100 * \text{Distancia recorrida}}$
$q_t$	Consumo específico de combustible por cantidad de carga transportada	[l/100tkm]	$\frac{q}{t}$
R	Resistencia a la rodadura	[N]	DF
s	Coefficiente de asimetría		Ecn. 15
$S_1$	Matriz de covarianzas del grupo 1		Ecn. 5
$S_2$	Matriz de covarianzas del grupo 1		Ecn. 5
SE	Error estándar del coeficiente estimado $\beta_i$		DF
$S_i$	Valores de consumos energético con media cero	[m3]	Ecn. 7
$S_p$	Matriz de covarianzas común		Ecn. 5
t	Tonelada	Ton	DF
$T_{amb}$	Temperatura promedio en la ciudad de Medellín	°C	DF
$T_{d,n}$	Temperatura promedio de la ciudad de Medellín en el día o en la noche	°C	DF
tStat	t-estadístico		
$V_T$	Volumen total de los tanques	m3	DF
$V_{T,patm}$	Volumen de gas almacenado en los tanques a 1atm.	[m3]	Ecn. 7
W	Carga	[N]	DF
$\bar{X}$	Consumo de combustible mensual promedio	[m3]	$\frac{X_i}{n}$
$X_i$	Consumo de combustible del mes i	[m3]	DF
$X_{ijg}$	Valor de la variable j en el elemento i del grupo g		Ecn. 2
$\bar{X}_{jg}$	Media de la variable j en el grupo g		Ecn. 2
$X_n$	Variables independientes de la regresión lineal múltiple		DF
Y	Variable dependiente (respuesta) de la regresión lineal múltiple		DF



$y_i^j$	Dato $i$ proyectado sobre la dirección $d_j$	DF
$\overline{y^j}$	Promedio de los datos proyectados sobre la dirección $d_j$	DF

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Significado	Unidad SI	Definición
$\tau$	Factor de carga	[kg/kg]	$\frac{W}{\text{Capacidad de carga del vehículo}}$
$\alpha$	Nivel de significancia propuesto	[%]	DF
$\beta_n$	Coefficientes de la regresión lineal múltiple		DF
$\sigma$	Desviación estándar	[m3]	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$
$\epsilon$	Residuo de la regresión lineal múltiple		DF

## Subíndices

Símbolo	Significado
$g$	Contador de grupos para la Ecn. 2
$i$	Contador de datos
$j$	Contador de direcciones para la Ecn. 15
$j$	Contador de variables para la Ecn. 2
$n$	Contador de variables

## Abreviaturas

Símbolo	Significado
BRT	Bus Rapid Transit
CAN	Controller Area Network
CERs	Certified Emission Reductions
CUSUM	Consumo acumulado de combustible
DF	Dimensión Fundamental
ECU	Electronic Control Module
EPM	Empresas Públicas de Medellín
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GNV	Gas Natural Vehicular
IDEn	Indicador de Eficiencia Energética
IPK	Índice de pasajeros por kilómetro
ISO	International Organization for Standardization
IVA	Impuesto al Valor Agregado

JB	Jarque-Bera
LRT	Light Rail Transit
M&T	Monitoreo de energía y establecimiento de metas
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
ND	No disponible
ONU	Organización de Naciones Unidas
ONUDI	Organización de Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial
SCDG	Suma de Cuadrados Dentro de Grupos
SGE	Sistema de Gestión de la Energía
TCM	Transmission Control Module

# Introducción

Según la Unidad de Planeación Minero Energética el sector transporte en Colombia es uno de los principales consumidores de energía, aumentando en los últimos 13 años su participación en algo más de un 10% dentro de la matriz energética y alcanzando para el 2012 una proporción del 44% correspondiente a 479.458 TJ de energía dentro del resto de sectores productivos, de ese total el 90% de la energía provino del petróleo y sus derivados, un 9% de energías renovables como los biocombustibles, el carbón y el gas natural, y solo un 0,05% de la electricidad, todo ello dividido en diferentes modos de transporte tales como el fluvial, marítimo, ferroviario, aéreo y carretero, este último para el 2013 estaba compuesto entre otros por 65.980 buses, 280.802 camiones y 56.735 tracto camiones activos, en los cuales se utiliza principalmente el Diesel como combustible, y en un menor porcentaje la gasolina y el GNV (Gas Natural Vehicular) (Botero, Anzola, Martínez, & Rodríguez, 2015).

En este sector se encuentran también incluidos los sistemas de transporte masivo, los cuales han constituido una apuesta a las problemáticas de movilidad en las zonas urbanas más aglomeradas y de integración a otras perimetrales o que están en proceso de urbanización. El más claro ejemplo de ello se encuentra en la ciudad de Medellín donde se ha implementado un sistema que inició desde 1995 con un transporte ferroviario a fin de intercomunicar el área central de la ciudad, años más tarde se fue estructurando un sistema multimodal constituido por teleférico en 2004, buses BRT 2011, buses alimentadores en 2013 y tranvía para el 2016, los cuales han logrado la interconexión de importantes zonas aledañas al centro de la ciudad.

La gran importancia que tienen los vehículos dentro de los sectores productivos y los impactos económicos y ambientales que produce el uso de combustibles fósiles, ha motivado a muchos administradores al redireccionamiento de las estrategias involucradas en la gestión de sus flotas hacia el uso adecuado y eficiente de la energía. En este sentido, la presente investigación se refiere al sistema de gestión de la energía como una primera estrategia para

disminuir costos y los impactos medioambientales que se generan por su actividad comercial (transporte de carga/pasajeros), además de abrir posibilidades de incorporar beneficios tributarios como la exclusión del Impuesto al Valor Agregado (IVA) para la compra de vehículos, comercio de Bonos Ambientales (CERs) cuando los proyectos hacen parte del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), entre otros.

Los sistemas de gestión han sido definidos como “un conjunto de reglas y principios relacionados entre sí de forma ordenada, para contribuir a la gestión de procesos generales o específicos de una organización. Permite establecer una política, unos objetivos y alcanzar dichos objetivos. Un sistema de gestión normalizado es un sistema cuyos requisitos están establecidos en normas de carácter sectorial, nacional, o internacional” (THINK&SELL, 2016). El sistema de gestión de la energía ha sido estandarizado mediante la norma ISO 50001, y aunque el sistema de gestión de flota no está catalogado de esta manera, si es posible lograr que sus procesos internos sigan patrones basados en normas como la ISO 9001, ISO 14001, entre otras.

En este sentido, el sistema de buses BRT a cargo del sistema Metro de la ciudad de Medellín ha incluido un programa de gestión que incluye a los conductores, la operación y el mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo, pensados en lograr impactos principalmente sobre la calidad del servicio, la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, pero a pesar de que se ven enmarcados bajo el concepto de la gestión de flotas no se identifican esfuerzos hacia el análisis de variables y evaluación de indicadores alrededor de la eficiencia energética.

La propuesta de implementación de un sistema de gestión de la energía en una flota de vehículos como la del Metro de Medellín estaría enfocada principalmente sobre el consumo de combustible, lo cual requeriría fundamentalmente una caracterización que incluya los procesos de mantenimiento, gestión de los conductores, nivel tecnológico de los equipos, análisis de las rutas y los sistemas de información, por lo tanto cuestionamientos sobre ¿qué variables son influyentes en el consumo de combustible? y ¿qué impactos en términos de optimización o reducción de combustible se podrían esperar? han surgido alrededor del tema, y dar respuesta a ellos motivará el planteamiento de oportunidades de mejora que permitan alinear cada una las actividades que se desarrollan hacia un mejor aprovechamiento del combustible.

Finalmente, la necesidad de resultados rápidos que tienen las empresas exige la implementación de sistemas de gestión simples y efectivos, sin embargo el nivel de detalle requerido para la caracterización de una flota demanda documentar una cantidad de información que puede ser considerable haciendo que los análisis corrientes de datos sean poco efectivos, por lo tanto se debe acudir a métodos estadísticos más especializados como el análisis multivariante procesado por computadora, de tal manera que se logre obtener resultados más rápidos, confiables y que permitan identificar los niveles de influencia de cada una de las variables medidas con el consumo energético.

## **OBJETIVO GENERAL**

Proponer la inclusión del componente de eficiencia energética al sistema de gestión actual de la flota de buses BRT del Metro de Medellín mediante el planteamiento de estrategias que permitan hacer un uso eficiente del combustible asociado al funcionamiento de los vehículos.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Revisar el estado del arte sobre los Sistemas de Gestión de la Energía (SGE) y la gestión de flotas vehiculares.
- Caracterizar el actual sistema de gestión de flota e identificar aquellas variables involucradas en el funcionamiento de los vehículos que están en función del consumo de combustible.
- Mediante un análisis multivariado de datos determinar el nivel de influencia de las variables de funcionamiento sobre el consumo de combustible.
- Proponer oportunidades de mejora que permitan optimizar a través de las variables analizadas el consumo de combustible en los vehículos y una estrategia de incorporación del sistema de gestión de energía a la gestión de flota actual.
- Validar la optimización del consumo de combustible esperado con la implementación del sistema de gestión de la energía mediante un análisis a los vehículos en prueba de ruta bajo unas condiciones determinadas y proyecciones obtenidas mediante modelos estadísticos de regresión.

## **METODOLOGÍA**

Este proyecto busca proponer un sistema de gestión de la energía al programa actual de gestión de flota mediante la implementación de estrategias que conduzcan al uso eficiente del combustible a través de ciertas actividades asociadas al funcionamiento de los vehículos tales como la conducción, logística y el mantenimiento. Para lograrlo es importante que todo su

desarrollo esté enmarcado bajo los parámetros del ciclo P-H-V-A y esto implica entre otras cosas, una selección adecuada de variables, una metodología para su medición y monitoreo, y su representación mediante Indicadores de Eficiencia Energética (IDEn).

En primer lugar, se ha caracterizado el sistema de gestión que actualmente se tiene para la administración de esta flota, entre ellos la logística asociada a los conductores, el mantenimiento y la operación, además de las especificaciones técnicas de los vehículos, condiciones de demanda del servicio, rutas y el uso que se les da. Todo esto es importante para conocer la flota y saber en términos generales cómo opera realmente.

Luego, han de seleccionarse diversas variables que bajo ciertos criterios puedan estar asociadas al consumo de combustible de los vehículos, y ello implica la identificación de aquellas fuentes confiables que proporcionen datos constantes sobre su funcionamiento. Para el proyecto se han seleccionado dos fuentes de información, la primera corresponde a una base de datos donde se registra información en tiempo real mediante GPS acerca del proceso de conducción y cuya finalidad es auditar a los conductores individualmente para garantizar la adecuada operación de los buses, y la segunda tiene que ver con la información generada por los diferentes computadores a bordo de sistemas como el motor, frenos y transmisión, los cuales se comunican para lograr un adecuado funcionamiento del bus, los datos que se transfieren entre módulos pueden ser tomados mediante la conexión de un computador portátil y un respectivo software a la línea principal de comunicación llamada CAN (En inglés Controller Area Network).

Sin embargo, la gran cantidad de variables y datos que se pueden obtener hace que los análisis sean complejos y se pueda ocultar información valiosa si no se les hace un adecuado tratamiento estadístico. El análisis multivariante de datos es una herramienta que permite comprender el comportamiento, relación y nivel de influencia que tienen las variables seleccionadas sobre la variable respuesta (para el caso de estudio hay dos Rendimiento instantáneo y Consumo de combustible), además de facilitar la exclusión de aquellas que no aportan suficiente información al problema.

Posteriormente, se proponen oportunidades de mejora a través de un plan de acción sobre cada variable significativa en función de optimizar la variable respuesta y unos indicadores IDEn permitirán auditar la efectividad de las actividades que se proponen.

Finalmente, el sistema de gestión de la energía propuesto será validado a través de unas pruebas de ruta donde se evalúa el desempeño de las variables respuesta con la operación que tienen actualmente los vehículos en comparación con los resultados esperados al optimizar las variables explicativas en los modelos de regresión lineal. Teniendo en cuenta lo anterior se establece la viabilidad y el impacto que se tendría en la flota en términos de costos y/o combustible ahorrado.

### **ALCANCES DEL TRABAJO**

El programa de gestión de la energía planteado se enfoca en la reducción u optimización del consumo de combustible propiamente de los vehículos mediante la proposición de actividades más eficientes que se sustentan por un análisis de variables medidas sobre el motor, transmisión de velocidades, conducción, y otras que han sido recopiladas de las labores de mantenimiento y conducción. De esta manera, el presente estudio se limita a analizar los vehículos y no se incluye la evaluación de variables provenientes de equipos de oficina, herramientas utilizadas para la ejecución del mantenimiento, agentes externos que prestan servicios o suministran productos a la flota, o de vehículos que por el nivel tecnológico asociado a los diferentes sistemas electromecánicos no permitan la medición de variables que se pretenden estudiar.

Adicionalmente, no se busca dar juicios de valor a los sistemas actuales de gestión tales como de logística, de mantenimiento ni capacitación a conductores, y solo se limitará a proponer elementos asociados a la gestión eficiente de la energía que puedan ser incluidos dentro de ellos.



## Marco teórico

### 1.1 Gestión de la energía

La energía es definida como la capacidad que tiene un cuerpo de realizar un trabajo, la cual se transforma, conserva y además tiene calidad. Esta última característica denominada también como potencial de trabajo se define en términos de lo valiosa y atractiva que es para el funcionamiento óptimo de un sistema, es por ello que gran cantidad de la energía asociada a los combustibles fósiles que incluyen el carbón, petróleo y gas natural ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de todos los sectores productivos a través de una dinámica basada en la satisfacción de la demanda con el aumento de la oferta, trayendo como consecuencia un acelerado agotamiento de los recursos no renovables, disminución de la calidad de vida en términos de contaminación y mayores demandas en obras de infraestructura que incluyen centrales eléctricas, líneas de transmisión, logística, entre otras.

El protocolo de Kyoto es un instrumento que ha establecido metas cuantitativas específicas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero obligatorias para los países desarrollados y con economías en transición, motivando así a diversas organizaciones al planteamiento como estrategia inmediata de una gestión de energía, la cual se realizaba solo en algunos de sus procesos productivos para reducir las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) y el consumo de energía sin afectar la calidad de sus productos y servicios ofertados. A raíz de la proliferación de los diversos planes de gestión de la energía, la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) realizó la solicitud a la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) la formulación de una norma estándar sobre sistemas de gestión de la energía que cobijara todos los procesos de una organización, la cual tiene por objetivo principal el de “conducir a reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero, el costo de la energía, y otros impactos ambientales

relacionados, a través de la gestión sistemática de la energía” (“ISO - International Organization for Standardization,” 2015). El 15 de junio de 2011 se publicó la norma ISO 50001 y como respuesta varios países, entre ellos España y EEUU, la han implementado dentro de sus diferentes sectores productivos.

Además del cumplimiento de los principales objetivos por el que se planteó dicha norma y sus antecesoras, otros motivos han impulsado su apropiación en los sectores productivos. En primer lugar, los resultados del balance económico entre los costos de implementación de un sistema de gestión de la energía y los ahorros medibles a través de indicadores pueden ser positivos y con importantes diferencias siempre que se focalice el gasto sobre las acciones más efectivas para mantener y aumentar los ahorros, en segundo lugar permite dar un orden a las empresas en términos de visiones de largo plazo, objetivos y metas, y finalmente asegurar la conformidad con su política energética y ser demostrada a otros a través de una certificación emitida por una entidad evaluadora externa.

Desde el punto de vista del comportamiento de los consumidores se ha visto gran influencia en ellos por los impactos ambientales y la afectación que hay en su calidad de vida, por lo tanto el consumo de “Productos Verdes” estimulan una sensación de autovaloración debido a la conciencia de estar realizando una acción ecológica. En consecuencia existe una motivación para las organizaciones en valorar los recursos naturales que utilizan y sus implicaciones para el medio ambiente mediante la determinación de la huella de carbono de sus productos o servicios, esto sin embargo demanda un análisis y la reevaluación del consumo de las materias primas y energía, las tecnologías existentes, la legislación ambiental aplicable, las restricciones, tributos y sanciones, los cuales van a afectar los costos de los productos a ofertar pero impulsaran su competitividad (Villalba, 2008).

Un sistema de gestión de la energía involucra entonces diversas variables en relación con la eficiencia energética, el tipo de uso y consumo de la energía de una organización, por ende es necesaria la identificación e inventariado de todas las instalaciones consumidoras, almacenadoras o generadoras de energía, los equipos que las constituyen y todos los tipos de formas de energía consumidas en ellas, además de unos sistemas adecuados de medida que aprovisione de datos a unos indicadores de desempeño para proporcionar finalmente a los administradores resultados y tendencias que favorezcan la identificación de oportunidades de

mejora, planificación y ejecución de actividades en función de la producción, tecnologías, logística, etc. para promover el mejoramiento continuo del sistema de gestión (Carretero Peña & García Sánchez, 2012).

Dichos indicadores denominados como indicadores de desempeño energético, además de evaluar el sistema de gestión deben permitir la comparación con respecto a índices internacionales establecidos por cada sector económico que pueden servir de base para los programas de optimización energética, algunos de estos indicadores estandarizados a nivel industrial son:

- Consumo específico de energía: relaciona el consumo de energía con una actividad o producto físico (ej. cal/ton de producto).
- Intensidad energética: es utilizado para evaluar la eficiencia energética a niveles agregados y se define como la relación entre el consumo de energía y el valor de un indicador macroeconómico (ej. Tcal/PIB).
- Ahorro energético: refleja, en términos absolutos, magnitudes de energía ahorrada.

## **1.2 Norma ISO 50001: 2011**

La norma ISO 50001 como bien se ha indicado permite estandarizar y sistematizar los esfuerzos de las organizaciones para su gestión energética por medio de la mejora continua. Sus objetivos específicos son diversos, entre ellos están:

- Ayudar a las organizaciones a aprovechar mejor sus actuales activos de consumo de energía.
- Crear transparencia y facilitar la comunicación sobre la gestión de los recursos energéticos.
- Promover las buenas conductas y mejores prácticas en la de gestión de la energía.

- Ayudar a las instalaciones en la evaluación y dar prioridad a la aplicación de nuevas tecnologías de eficiencia energética.
- Facilitar la mejora de gestión de la energía para los proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Permitir la integración con otros sistemas de gestión organizacional, como el ambiental, y de salud y seguridad (“ISO - International Organization for Standardization,” 2015).

Estos objetivos se pueden lograr mediante la implantación del ciclo de mejoramiento continuo P-H-V-A (Planear, Hacer, Verificar y Actuar, Figura 1), donde el Planear se enfoca en entender el comportamiento energético de la organización para establecer los controles y objetivos, el Hacer busca implementar procedimientos y procesos regulares con el fin de que sean controlados y mejorados, el Verificar tiene que ver con la monitorización, medición y reporte de los procesos con base a las políticas, objetivos y características clave de las operaciones, y el Actuar se refiere a la toma de acciones para mejorar continuamente el desempeño energético de acuerdo a los resultados medidos .

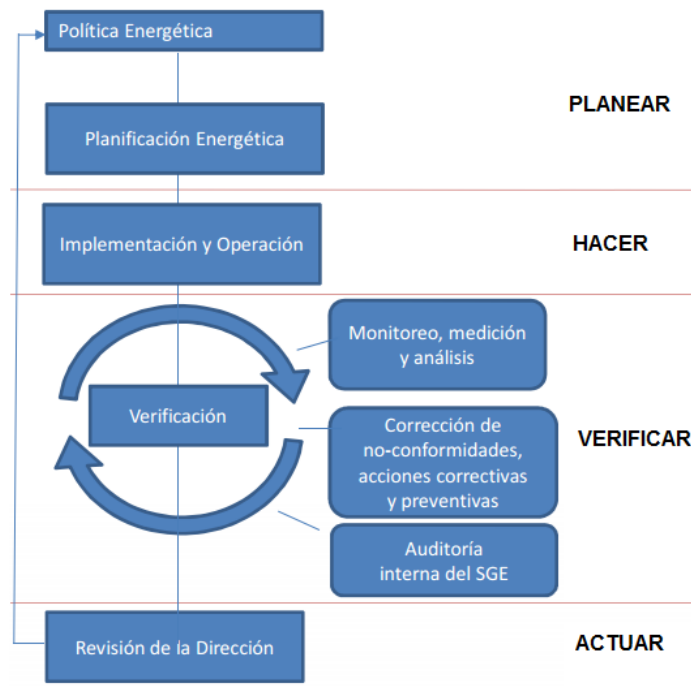


Figura 1: Ciclo de mejoramiento continuo P-H-V-A. Peirano (2012).

La norma ISO 50001 fracciona los numerales que corresponden a cada componente del ciclo, sin embargo, es importante identificar cuáles pueden ser de carácter medular (que son todos aquellos procedimientos esenciales para observar y mejorar el desempeño energético) y cuáles de carácter estructural (que proveen la estructura en torno a los requerimientos medulares y que convierten a la gestión de la energía en un proceso sistemático y controlado). En la Tabla 1 se clasifican aquellos numerales de la norma dentro del ciclo P-H-V-A.

**Tabla 1:** Clasificación de los numerales de la norma ISO 50001 en el ciclo P-H-V-A.

REQUERIMIENTO	PARTE DEL CICLO	NUMERAL	TÍTULO
De carácter estructural	Planear	4.4	Planificación energética.
		4.4.1	General.
		4.4.2	Requerimientos legales y de otro tipo.
De carácter medular		4.4.3	Revisión energética.
		4.4.4	Línea base energética.
		4.4.5	Indicadores de desempeño energético.
		4.4.6	Objetivos energéticos, metas energéticas y plan de acción de gestión de la energía.
De carácter estructural	Hacer	4.5	Implementación y operación.
		4.5.1	General.
		4.5.2	Competencias, entrenamiento y sensibilización.
De carácter medular		4.5.3	Comunicación.
		4.5.4	Documentación.
		4.5.5	Control operacional.
		4.5.6	Diseño.
		4.5.7	Compra de servicios energéticos, productos, equipos y energía.
De carácter estructural	Verificar	4.6	Verificación.
De carácter medular		4.6.1	Monitoreo, medición y análisis.
De carácter estructural		4.6.2	Evaluación de cumplimiento con los requerimientos legales y de otro tipo.
		4.6.3	Auditoría interna del Sistema de Gestión de la Energía.
		4.6.4	No-conformidad, corrección, acción correctiva y acción preventiva.
		4.6.5	Control de registros.
De carácter estructural	Actuar	4.7	Revisión de la Alta Dirección.
		4.7.1	General.
		4.7.2	Input a la revisión de la Alta Dirección.
		4.7.3	Output de la revisión de la Alta Dirección.

Fuente: Elaboración propia a partir de Peirano (2012).

### 1.3 Gestión de flotas

La gestión de flotas es un enfoque administrativo que se ha desarrollado con el objetivo de maximizar el rendimiento de los vehículos haciendo el mejor uso de los recursos disponibles (IDAE, 2006). Villalobos (2010) divide en dos dimensiones la gestión de flotas, la primera

corresponde a una dimensión “Operativa” que se encarga de resolver los problemas que se presentan en la ejecución del servicio de la manera más óptima, esto incluye el mantenimiento de equipos y el entrenamiento y motivación al personal. La segunda dimensión denominada “Estratégica” tiene relación con la configuración de la flota y las operaciones, contempla el diseño y la optimización del sistema y la infraestructura que se gestiona, así como los proyectos de mejora significativa o de salto tecnológico necesarios para la sustentabilidad.

El éxito de un sistema de gestión de flotas está asociado a una adecuada implementación de estas dos dimensiones, puesto que de ello depende la confiabilidad y disponibilidad de los vehículos que son elementos claves para la prestación del servicio y satisfacción del cliente, como consecuencia entonces habrá productividad para las empresas.

El término confiabilidad es definido por Mesa, Grajales, Ortiz, Sánchez, & Pinzón (2006) como “la confianza que se tiene de un componente, equipo o sistema para desempeñar su función básica, durante un período de tiempo preestablecido, bajo condiciones estándares de operación”, esto significa que un programa de gestión de flota debe garantizar en cierto nivel que cada uno de sus vehículos no presentaran novedades importantes en sus sistemas electromecánicos que impliquen el retraso de una carga y por lo tanto un incumplimiento hacia los clientes.

La disponibilidad por su parte se define como “la confianza de que un componente o sistema que sufrió mantenimiento, ejerza su función satisfactoriamente para un tiempo dado”, esto implica que el mismo programa de gestión de flota debe mantener la mayor cantidad de tiempo posible los vehículos disponibles para la prestación de su servicio comercial (Mesa, Grajales et al., 2006).

Desde el punto de vista del cliente, los niveles de confiabilidad y disponibilidad significan en gran medida la calidad del servicio y por lo tanto el reflejo de la efectividad de su sistema de gestión de flota. La efectividad es un valor que se consigue mediante dos aspectos de la actividad mencionados por Cobos (n.d.): eficacia y eficiencia. La eficacia es hacer que lo planificado y lo realizado se aproximen al máximo, es decir, efectuar la planificación previamente establecida para cumplir los compromisos asumidos con los clientes e igualar o superar sus expectativas; la eficiencia se refiere a la utilización de los menores recursos

posibles (operativos y/o materiales) para obtener el mismo producto o servicio, o también la utilización de los mismos recursos pero con mejoras en su cantidad o calidad.

A continuación se describen los programas que integran las dos dimensiones del sistema de gestión de flotas:

### 1.3.1 Mantenimiento de los vehículos

El mantenimiento es un servicio que agrupa una serie de actividades encaminadas a mantener los vehículos en un estado óptimo de funcionamiento y asegurar la seguridad del conductor y los pasajeros/carga (Cobos, n.d.), por lo tanto, un adecuado mantenimiento regular, la eliminación de peso innecesario, las alineaciones de los ejes y el control y ajuste de las presiones en los neumáticos son algunas actividades que van a cumplir dicho propósito y en consecuencia la reducción en los consumos de combustible. En la actualidad se han desarrollado diversos planes de mantenimiento con base en un conjunto de tareas programadas y unos criterios técnicos de los cuales 3 se puede encontrar comunmente en las flotas de vehículos:

- **Mantenimiento correctivo:** Se basa en la atención de un vehículo cuando este presenta una falla inesperada y obliga a detener parcial o totalmente la prestación de su servicio.
- **Mantenimiento preventivo:** Se enfoca en una atención programada en términos de kilometraje recorrido u horas del motor de los componentes del vehículo con base a las recomendaciones del fabricante y experiencia adquirida antes de que lleguen al final de su vida útil y ocasionen una atención por mantenimiento correctivo. También se debe incluir un alistamiento diario de flota por parte de los conductores quienes revisan niveles de los fluidos del motor, refrigerante, dirección, etc. y garantizarán que los sistemas mecánicos van a funcionar adecuadamente en cada ruta.
- **Mantenimiento predictivo:** Se basa en predecir exactamente la falla antes de que esta suceda mediante equipos y métodos de monitoreo como análisis de muestras de aceite, toma de vibraciones y temperatura, las cuales proporcionarán información del momento

exacto donde algunos sistemas del vehículo dejan de operar óptimamente (García Garrido, 2009).

El programa de mantenimiento define las condiciones de como se implementan o atienden cada uno de estos tres tipos de mantenimiento de acuerdo al tamaño, recursos y la conveniencia, adicionalmente existen flotas que requieren la ejecución de otras actividades ligadas a normatividades nacionales o por las exigencias físicas a las que se encuentran sometidos, entre ellos están:

- Alistamientos o chequeos diarios.
- Inspecciones periodicas de seguridad a los principales sistemas electromecánicos.
- Controles de rendimiento.

Todo plan de mantenimiento busca ser el más efectivo y por lo tanto su gestión puede ser evaluada y replanteada mediante el control y seguimiento de unos indicadores, Jimenez (n.d.) nombra algunos de estos por ser ampliamente utilizados en el sector:

- **Control del MTBF, (Mean time between failures):** tiempo medio entre fallos, el objetivo básico es que el equipo tenga un MTBF elevado y estable, porque eso querrá decir que los fallos están controlados, y por tanto tenemos la oportunidad de prevenirlos. Un MTBF que fluctúe nos está diciendo que el equipo no está en absoluto controlado.
- **Control del MTTR, (Mean time to repair):** tiempo medio para reparar, conocer exactamente el tiempo dedicado a las intervenciones, conocer por qué y cómo estamos invirtiendo el tiempo para reparar, qué problemas tenemos adicionales a nuestro trabajo, etc.
- **Control del %Mto Planificado versus %Mto No Planificado:** ¿son los equipos los que nos controlan o es Mantenimiento el que controla los equipos?. Un buen Mantenimiento



sería aquel en el que el 90% de las intervenciones fuese planificada, el esfuerzo debe orientarse hacia aquí.

- **Control del N° Fallos:** el número de ellos y cuántos de cada categoría. Puede darse el caso que la gran mayoría de ellos sean averías, por tanto el coste asociado será elevado tanto en mano de obra como en materiales, o puede que las paradas hagan que nuestro equipo tenga una eficiencia muy pobre, por tanto también el coste se verá afectado.

### 1.3.2 Capacitación a conductores

Las tecnologías implementadas en los vehículos han evolucionado hasta tal punto que son adaptativas al conductor y logran cierta mejoría sobre el consumo de combustible, las emisiones de GEI y el cuidado del equipo, es por ello que la conducción convencional arraigada en la mayoría de conductores debe ser retroalimentada mediante procesos de capacitación con el objetivo de aprovechar las mejoras tecnológicas que a los vehículos se le han integrado, a esto se denomina "Conducción eficiente". Adicionalmente, la conducción eficiente tiene impactos significativos sobre vehículos poco tecnológicos debido a que la ausencia de estas mejoras tecnológicas le proporcionan al conductor la potestad de manipularlos a su estilo, y si este es adecuado entonces el vehículo tendrá un mejor rendimiento.

Los procesos de capacitación a los conductores deben incluir entonces diversas técnicas de conducción tales como el arranque del motor, realización de los cambios de marchas, desaceleraciones, entre otras, también un conocimiento de las funciones y características de los componentes principales del vehículo, y por último debe ser un proceso de capacitación continuo, ya que por lo general los conductores retoman con el tiempo su estilo de conducción anterior. Los resultados esperados en todo este proceso son expuestos por IDAE (2011) en la siguiente lista:

- **Ahorro de energía:** el conductor, con su comportamiento, tiene una gran influencia sobre el consumo de combustible del vehículo, dando lugar a ahorros del orden del 10%.

- **Ahorro económico:** el combustible es el principal gasto que se genera en la actividad de un vehículo, entonces un ahorro en este traerá como consecuencia ahorros de dinero.
- **Reducción de los costos de mantenimiento:** una conducción eficiente provoca que los distintos sistemas del vehículo (frenos, embrague, caja de cambios, motor, etc.), estén sometidos a un esfuerzo inferior al que soportarían en el caso de la conducción convencional.
- **Reducción de emisiones:** la reducción del consumo de combustible va ligada a una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de contaminantes al medio ambiente.
- **Mejora de la velocidad media:** con la conducción eficiente se realizan las aceleraciones de una forma más suave, se evita en mayor medida las detenciones y se aprovechan mejor las inercias que presenta el vehículo en su circulación.
- **Reducción del riesgo de accidentes:** La conducción eficiente incrementa la seguridad en la conducción, ya que estas técnicas de conducción están basadas en la previsión y en la anticipación.
- **Mejora del confort:** la conducción eficiente es un estilo impregnado de tranquilidad y sosiego que reduce las tensiones y el estado de estrés producido por el tráfico al que están sometidos los conductores.

### 1.3.3 Uso de tecnologías más eficientes y menos contaminantes

En el sector transporte existe una amplia oferta de tecnologías de última generación para reducir GEI y motores que utilizan combustibles alternativos a los que se puede acceder fácilmente gracias a la apertura de mercados y las políticas gubernamentales planteadas alrededor del cambio climático, los cuales han sido aprovechados por las compañías ensambladoras para integrarlos a sus vehículos y de esta manera proveer al mercado de alternativas que además de minimizar la contaminación permiten lograr mayor eficiencia energética.

Es claro que las tecnologías de última generación son más costosas respecto a las convencionales, sin embargo se evidencia que gran cantidad de vehículos de transporte urbano en ciudades como Medellín - Colombia o Lima – Perú incluyen motores dedicados a GNV, principalmente por los beneficios tributarios que ofrecen los gobiernos, exoneración de las restricciones de tránsito al interior de las ciudades, exigencias y compromisos de gobierno en búsqueda de reducir los niveles de GEI emitidos a las atmósfera mediante la implementación de normas de emisión como EPA 2010 o EURO VI. Las restricciones son cada vez más exigentes pero los beneficios son evidentes y esto ha motivado a los fabricantes para desarrollar e incluir otras tecnologías como catalizadores de gases de escape pasivos y sistemas de recirculación de gases de escape (EGR por sus siglas en inglés) en los motores dedicados a GNV, posibilitando alcanzar reducciones de 42,5% en emisión de NOx y de 100% en material particulado en comparación a su homólogo en Diesel (cumminswestport.com, 2015).

Por otra parte, los fabricantes de motores a Diesel se han visto obligados a la instalación de complicados sistemas de control de emisiones en cumplimiento a las mismas normatividades EPA 2010 o EURO VI, lo cual demanda el uso de convertidores catalíticos oxidativos, filtros de partículas y sistemas de catálisis selectiva para la reducción simultánea de óxidos de nitrógeno y material particulado. La incorporación de estos dispositivos ha tenido un importante efecto en los costos operativos de estos vehículos y una reducción en la disponibilidad de los autobuses que se asocia a la mayor cantidad y complejidad de los equipos y sus sistemas de control (Gonzalez, 2012).

### **1.3.4 Gestión de operaciones**

Las necesidades de transportar cada vez mayor cantidad de materias primas, productos y personas con el menor uso de los recursos ha aumentado la complejidad y exigido una planeación logística mejor ejecutada a los administradores de flota, es por ello que tareas como la elección de rutas, la asignación de vehículos y de conductores se han replanteado hacia un enfoque de eficiencia o lo que es llamado “gestión eficiente de operaciones”, esta se define como todas aquellas acciones que contribuyen a la mejora de la función de distribución, bien

sea en términos de nivel de servicio, mejora de la calidad, reducción de costos, etc. (Brain Trust Consulting Services, 2009).

Aunque no todas las flotas de transporte funcionan de la misma manera, se especifica un poco a continuación las tres tareas generales que envuelven el día a día de los administradores de flota:

**Elección de las rutas:** Iglesias (2013) define las rutas como itinerarios o recorridos que deben realizar los vehículos para atender las necesidades de transporte de carga o pasajeros. Existen tres tipos de rutas (Iglesias, 2006):

- **Rutas fijas:** son rutas estandarizadas y permanentes, es decir, no sujetas a cambios. Se caracterizan por tener puntos de recogida y entrega fijos continuos o fijos discontinuos durante un periodo de tiempo. Por lo general el diseño de estas rutas se realiza una sola vez y su planificación presenta leves variaciones con respecto al estándar que se ha establecido.
- **Rutas periódicas:** son rutas en las cuales se presta un servicio para cierto periodo de tiempo con el fin de satisfacer a clientes con determinadas exigencias de nivel de servicio. Por ejemplo, lunes y miércoles se realiza una ruta y martes y jueves otra.
- **Rutas dinámicas:** son rutas que se deben ajustar de acuerdo a las necesidades cambiantes de los clientes. Este tipo de rutas demandan que sean diseñadas y planificadas permanentemente, además de adecuados sistemas de información que alimenten de manera precisa y a tiempo sobre el estado de las vías, tráfico, etc.

Además, diversas metodologías se han desarrollado para la elección de rutas eficientes, unas se refieren a modelos complejos basados en algoritmos que demandan conocimiento y herramientas computacionales pero asignan rutas adecuadas de manera rápida, y otras se basan en la experiencia de los administradores de flota. Independiente de la metodología se busca elegir las rutas que presenten menos inconvenientes en la saturación del tráfico y que al mismo tiempo minimice el número de kilómetros a realizar. Cuando se presenten varias rutas

de parecidas características, se escogerá la que menos dificultades orográficas presente con el fin de lograr un menor consumo medio del vehículo (IDAE, 2006).

**Asignación de vehículos:** esta actividad busca un uso eficiente de la flota de vehículos en términos de capacidad, flexibilidad, accesibilidad, seguridad y costo. En su realización se deben evaluar las características y capacidades de los vehículos para efectuar las asignaciones de tal manera que se optimice la ocupación de la flota. Vujanovic, Mijailovic, Momcilovic, & Papic (2010) han determinado que el factor de carga, correspondiente a la relación entre el peso de la carga y la capacidad de carga del vehículo (mejor especificado en la sesión 2.3), tiene un impacto directo sobre el uso del combustible, además de un mejor aprovechamiento de los vehículos.

**Asignación de conductores:** los recursos humanos en una flota de transporte representan importantes costos directos e indirectos, es por eso necesario plantear una metodología adecuada de asignación teniendo en cuenta cosas como los momentos de mayor demanda del servicio, los momentos para realizar los cambios de turno, la asignación de rutas al personal de acuerdo a su experiencia y gustos, entre otras. En general, una buena coordinación que evite tiempos muertos y una carga laboral para los conductores adecuada tendrá impactos positivos sobre su manera de conducir y la disminución en los accidentes de tránsito (Cobos, n.d.).

Finalmente, existe un indicador muy popularizado en las flotas de transporte público de personas que es el IPK (Índice de Pasajeros por Kilómetro), el cual permite a los administradores evaluar la demanda y oferta del servicio mediante relación entre la cantidad de pasajeros realmente movilizados por bus con la oferta dada en kilómetros recorridos por el bus, además de facilitar comparaciones entre flotas o rutas de diferentes zonas, medir la efectividad de una ruta, clasificarlas y estratificarlas.

### 1.3.5 Sistemas de información

Los sistemas de información se definen como “un conjunto formal de procesos que, operando sobre una colección de datos estructurada de acuerdo a las necesidades de la empresa, recopila, elabora y distribuyen selectivamente la información necesaria para la operación de dicha empresa y para las actividades de dirección y control correspondientes, apoyando, al

menos en parte, los procesos de toma de decisiones necesarios para desempeñar funciones de negocio de la empresa de acuerdo con su estrategia” (Hernandez, 1996). Un adecuado sistema que permita la recolección y almacenamiento de la información es determinante para que los administradores de flota puedan realizar análisis y toma de decisiones de manera confiable, a tiempo y alineada con los programas que hacen parte el sistema de gestión eficiente de flotas.

Es necesario entonces el compromiso e idoneidad de un personal que pueda administrar, mantener y generar los reportes y seguimientos necesarios, sin embargo el volumen de vehículos que puede tener algunas flotas y la gran cantidad de información requerida para su administración, ha demandado el uso de diversas herramientas telemáticas que incluyen ubicación por GPS, reportes de códigos de falla sobre los sistemas mecánicos, estilos de conducción, seguimiento a otras variables en tiempo real como la temperatura del líquido refrigerante, presión de aceite, etc., además de información de viaje como nombre del conductor asignado, ruta planeada, tráfico, entre otras, gran parte de ellas pueden ser obtenidas a través de los sistemas CAN bus incluidos en vehículos de última generación y que son poco utilizados por falta de experiencia o simplemente no saber de su existencia (Cobos, n.d.).

## **1.4 Analisis multivariante de datos**

Muchas situaciones de la vida real se componen de diversas características que de alguna manera hacen parte fundamental de su esencia o su comportamiento, en este sentido la determinación y valoración de estas características pueden describir dichas situaciones mediante tratamientos estadísticos sin necesidad de conocerlas directamente. El análisis multivariante de datos es una herramienta que tiene por objeto el estudio estadístico de varias variables medidas en elementos de una población con los siguientes objetivos (Peña, 2002):

- Resumir el conjunto de variables en unas pocas nuevas variables, construidas como transformaciones de las originales, con la mínima pérdida de información. La metodología utilizada se desarrolla alrededor de modelos de regresión lineal que tienen la siguiente forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon \quad \text{Ecn. 1}$$

Donde Y corresponde a la situación o variable de estudio, y  $X_1, \dots, X_n$  todas las variables o características medidas.

La reducción de las  $X_n$  variables a un grupo más pequeño posibilita hacer evaluaciones o proyecciones de manera más fácil de esa situación, con menores probabilidades de error y mayor rapidez en la recolección de los datos, sin embargo no se debe sacrificar la información que forma parte esencial de ella, y es por ello que los niveles de significancia deben ser establecidos previamente con el fin de aceptar o rechazar las pruebas de hipótesis correspondientes, al igual que los niveles mínimos aceptables de explicación.

- Encontrar si existen agrupaciones entre los datos. Es importante en muchas situaciones determinar aquellas observaciones que tienden a agruparse en el espacio  $R^n$  en función de su similitud con el fin de identificar tendencias o tipos de estructuras internas que fácilmente no se observan.

Una de las técnicas más utilizadas para el análisis de conglomerados o Cluster es k-medias, este es un método de clasificación no supervisado que determina los centroides (medias) de los G grupos seleccionados que inicialmente se distribuyen aleatoriamente en el espacio  $R^n$ , luego mediante un proceso iterativo se recalcula cada centroide y se reubican los grupos hacia ese centroide hasta lograr que cada uno corresponda al centroide final de su respectivo grupo.

El criterio de homogeneidad que se utiliza en el algoritmo de k-medias es la Suma de Cuadrados Dentro de los Grupos (SCDG) para todas las variables, que es equivalente a la suma ponderada de las varianzas de las variables en los grupos:

$$SCDG = \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{n_g} (x_{ijg} - \bar{x}_{jg})^2 \quad \text{Ecn. 2}$$

Donde  $x_{ijg}$  es el valor de la variable  $j$  en el elemento  $i$  del grupo  $g$  y  $\bar{x}_{jg}$  la media de esta variable en el grupo.

- Clasificar nuevas observaciones en grupos definidos. Este objetivo se relaciona con el anterior y se considera como un método de clasificación supervisado ya que ubica una observación o individuo en un grupo previamente definido. Existen diversos métodos, la regla discriminante de Fisher y el Kernel basado en el Support Vector Machine.

El discriminante de Fisher busca determinar si unos grupos difieren en función de la media de una variable y emplear luego esa variable para predecir la pertenencia de una nueva observación a determinado grupo (Muñoz, 1998). Fisher asigna el individuo  $x$  a la población 1 si  $a'x > m$ , donde (Bailla & Grané, 2008):

$$a = S_p^{-1}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \quad \text{Ecn. 3}$$

$$m = \frac{1}{2} a' * (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \quad \text{Ecn. 4}$$

$$S_p = \frac{n_1 - 1}{n_1 + n_2 - 2} S_1 + \frac{n_2 - 1}{n_1 + n_2 - 2} S_2 \quad \text{Ecn. 5}$$

Donde,  $a$  es el vector discriminante de Fisher,  $S_p$  la matriz de covarianzas común,  $m$  la condición del discriminante de Fisher,  $n_1$  el número de individuos en el grupo 1 y  $n_2$  del grupo 2.

El método de Kernel es un algoritmo de aprendizaje mediante el cual se hace uso de al menos el 70% de los datos bien clasificados para saber si un individuo con ciertas características puede ser asignado en una población o en otra. Este método traza entonces un plano o una superficie con algún tipo de función como lineal, polinomial, cuadrática, etc., que encierre o separe los individuos de una población con los de otra en el entrenamiento, y a continuación se realiza una validación con el restante 30% de los datos bien clasificados para detectar si las tasas de error obtenidas pueden ser aceptables para la clasificación de los individuos en alguna de las poblaciones.

- Relacionar dos conjuntos de variables. En particular, podemos disponer de un conjunto de variables para dos situaciones determinadas y queremos relacionar ambos conjuntos



de variables. Los dos grupos de variables pueden corresponder a las mismas variables medidas en dos momentos distintos en el tiempo o en el espacio y lo que se busca es identificar aquella relación entre ambos conjuntos.

## Estado del arte

Como consecuencia de los impactos negativos sobre el medio ambiente y la magnitud de consumo de combustible que tiene el sector transporte, se han desarrollado diversas tecnologías y estrategias de gestión en la movilidad con tres enfoques principales, el primero es mejorar el interés por el uso de las flotas de transporte público con propósitos como el descongestionamiento de las vías públicas, incrementar la rentabilidad de las empresas, mejorar la calidad en el transporte de las personas, entre otros; también la reducción en las emisiones de GEI como objetivo principalmente de los gobiernos y sus compromisos internacionales; y finalmente la optimización del consumo de combustible que además de disminuir costos de operación también logra importantes reducciones en GEI (Shaheen & Lipman, 2007).

Múltiples tecnologías y estrategias de gestión se han planteado y evaluado en variadas investigaciones, por lo que es necesario conocer su metodología, resultados y propuestas a fin de establecer una base para el componente de eficiencia energética que se propone al sistema de gestión actual de la flota de buses BRT del Metro de Medellín. En términos generales se encontraron investigaciones que estudian el uso de las flotas de transporte público, incluso enfocado al tipo BRT; otras donde se analizan nuevos motores y equipos de postratamiento para los gases de escape, principalmente en aquellos que se han implementado en motores diésel y GNV, y su impacto en las emisiones de GEI; y finalmente se presentan algunos estudios y recomendaciones que buscan optimizar y reducir los consumos de combustible en los vehículos de diferentes maneras.

## **2.1 Evaluación sobre el uso de las flotas de transporte público BRT**

En los últimos años han aparecido nuevas alternativas para los sistemas convencionales de transporte público masivo buscando la movilización de mayor cantidad de personas con más rapidez, confiabilidad y rentabilidad, algunos ejemplos son los tranvías, los trenes ligeros (LRT por sus siglas en inglés), el metro y los buses BRT. Las ventajas operacionales de este último sistema, la relación costo – beneficio, y los impactos que se han visto en su entorno local (tales como el incremento en el comercio, proyectos residenciales de alta densidad, desaparición de rutas realizadas por buses convencionales y la integración con otros métodos de transporte como bicicleta, metro, entre otros) ha estimulado su implementación en diversos países, en especial América Latina, y diversos autores han valorado su acogimiento en función de la preferencia de los usuarios como se muestra a continuación.

Hensher (2007) valora el desempeño de diferentes sistemas BRT implementados principalmente en Asia, Europa y América Latina, en términos del incremento en el uso y satisfacción de los usuarios de sus sistemas. Encontró que los usuarios visualizan un contraste muy marcado entre las ventajas del BRT (tales como la velocidad, capacidad, frecuencia y costos del servicio) y las del transporte convencional (especialmente con buses y automóviles particulares); especialmente en la ciudad de Brisbane hubo un incremento del 40% de los pasajeros durante los primeros 6 meses al inicio de su operación (equivalente a un promedio de 58.000 usuarios diariamente), y transcurridos 3,5 años el incremento fue del 88%; por otro lado, en Pittsburg se observó que el número de pasajeros incrementó en un 23% después de 17 meses de haber sido implementado este (equivalente a un promedio 48.000 usuarios diariamente).

Así mismo, Deng & Nelson (2013) evaluaron el uso que tuvo el sistema de buses BRT llamado Southern Axis BRT Line 1 en la ciudad de Beijín. Encontraron que este sistema arrebató a los sistemas de transporte convencionales el 75,4% de sus viajes principalmente por mejoras en: la velocidad de viaje promedio durante las horas pico, que significó a los usuarios un ahorro en su tiempo de 38.3%; la frecuencia del servicio durante las horas pico fue en promedio de 1.5 minutos y en hora valle entre 2 y 3 minutos; la puntualidad del servicio tuvo un 90% de cumplimiento respecto al horario programado, lo cual fue considerablemente superior respecto

a las líneas de buses convencionales; y la calidad del servicio, donde se encontró que el 85.5% de las personas que usan los buses BRT están satisfechas principalmente por la alta velocidad del servicio y su comodidad.

Currie & Delbosc (2014) estudiaron los 10 corredores que existen actualmente con flotas de buses BRT en Australia con el objetivo identificar factores que mejoren su uso desde dos perspectivas: el transporte de pasajeros y la operación. El desempeño en el transporte de pasajeros se determinó mediante dos indicadores, el primero tiene que ver con el número de personas transportadas por kilómetros de ruta (IPK), esto es la cantidad de personas que utilizan el servicio en un viaje entre la cantidad total de kilómetros que tiene dicho viaje, lo que significa que un corredor que transporta mayor cantidad de pasajeros por kilómetros de ruta presenta una mayor ocupación del sistema, y el segundo es la cantidad personas transportadas por vehículo por kilómetro, que se interpreta como el número de abordajes (o frecuencia con que se utiliza el servicio) por bus en cada kilómetro de recorrido, de tal manera que a mayor concurrencia de pasajeros mayor es el uso del sistema. La implementación de tarifas bajas, longitudes adecuadas en las rutas, espaciamiento más corto entre paradas, amplia integración de los sistemas BRT con la red de tránsito y venta de tiquetes pre-pago, son estrategias que presentan impactos positivos en el uso del transporte de pasajeros debido a que aumentan el interés y las facilidades de los usuarios. Finalmente, el desempeño del sistema por el uso de la operación se determinó mediante el indicador de la velocidad promedio en los buses, por tal motivo las vías y derechos de paso exclusivos son algunas de las estrategias que se han implementado para aumentarlo.

Hensher, Li, & Mulley, 2014 presentan los resultados de un estudio enfocado a determinar aquellas características que hacen preferenciales los sistemas BRT a los usuarios y la frecuencia de su uso mediante un análisis multivariante realizado a datos recopilados de 121 sistemas BRT existentes en 12 países y que iniciaron operación entre los años 1974 y 2010. Primeramente, se determinó dentro de un grupo de variables continuas y categóricas aquellas que explican en mayor medida la variable respuesta "Preferencia de los usuarios" (en otros términos, el número de pasajeros transportados diariamente). Se encontró entre las variables explicativas que la variable respuesta aumenta cuando: la variable "Distancia entre las estaciones" aumenta, es decir, con mayor cantidad o menor distancia entre estaciones, lo cual mejoraría el acceso y la salida de los pasajeros; también el aumento de la variable "Cobro de

tarifas previas al abordaje” aumenta la preferencia del sistema ya que reduciría significativamente el tiempo de embarque y por ende una reducción en el tiempo total del recorrido, menos hacinamiento en las estaciones y reducción de la congestión dentro de los autobuses. Por el contrario, se encontró que la variable respuesta disminuye cuando las siguientes variables explicativas aumentan: “Puertas para los pasajeros en los lados izquierdo y derecho” (a diferencia de otras configuraciones que tienen puertas solo en el lado derecho o izquierdo), y la “Ubicación longitudinal de los carriles del bus con el flujo en los lados”.

En segundo lugar se determinó que la variable “Frecuencia de uso” tiene una relación positiva con la variable explicativa “Densidad de población”, lo que indica que una mayor densidad de población representa mayor demanda de pasajeros, y por ende mayor necesidad de los usuarios por el servicio; también el “Número de líneas troncales” tiene una estimación del parámetro positivo, esto significa que a mayor capacidad de un sistema BRT mayor es la frecuencia del servicio.

Por otro lado, Krelling & Badami (2016) enfocaron su estudio sobre buses de la India (no son BRT) que funcionan con motores a GNV y evaluaron la prestación de su servicio en términos de su desempeño mecánico y los costos. Observaron entonces que estos motores son entre 4% y 25% menos eficientes en consumo de combustible (expresado en términos de diésel equivalente) que los motores a diésel con similares características técnicas, razones que explican se debe al tipo de ciclo térmico del motor que es Otto, el peso y cantidad de los tanques necesarios para el almacenamiento del GNV; por otro lado evidenciaron que el número de fallas electromecánicas tuvo un aumento del 125% con la implementación de motores GNV en sus vehículos, lo cual representó un incremento en los costos de mantenimiento y administrativos por kilómetro recorrido. A pesar de las desventajas de este tipo de tecnología, la disminución de los impactos negativos sobre el medio ambiente fue el principal motivo de su uso, sin embargo han sido necesarias políticas de apoyo o compensaciones económicas para que su operación sea viable financieramente.

## **2.2 Impactos sobre la emisión de gases de efecto invernadero**

La cantidad de emisiones de partículas liberadas por un vehículo tiene una fuerte dependencia de la tecnología de combustión del motor, sistemas de postratamiento en el escape y las condiciones de funcionamiento del motor. En el primer caso se pueden encontrar comercialmente diversos tipos de motores que funcionan con combustibles alternativos como GNV, híbridos y eléctricos como una apuesta de largo plazo, sin embargo su introducción ha sido lenta debido a la naturaleza e impactos económicos para las empresas que acarrea una renovación de flota, además de requerir infraestructura y sistemas de abastecimiento especiales; en el segundo caso diversos equipos auxiliares se han desarrollado y han integrado a nuevos motores, entre ellos se puede encontrar los sistemas de Recirculación de Gases de Escape (EGR) y Reducción Catalítica Selectiva (SCR); finalmente, la optimización del combustible y adecuados procedimientos en la gestión de flotas además de reducir las emisiones de GEI también reducen los costos de operación, lo que hace de esta estrategia muy aceptada por los administradores de flota. A continuación se exponen los resultados de algunas investigaciones donde se estudian en buses los impactos en la reducción de GEI para estos tres casos.

Desde el punto de vista de las condiciones del motor, Soyly (2015) estudió el impacto que tiene la conducción que implica velocidad constante y aceleración frecuente sobre la generación de Número de Partículas (PN) por un motor Cummins diésel ISB de 6,7L. En el análisis de los datos recopilados se observó que durante las aceleraciones repentinas del motor el PN se acelera, esto se debe a que la relación óptima entre aire y combustible para proporcionar la torsión y velocidad requerida no se obtiene de manera inmediata, ya que la velocidad del flujo de aire va retrasado respecto a la velocidad de flujo de combustible generando una mezcla rica momentáneamente (este fenómeno es llamado turbo-lag).

Adicionalmente se observó que el vehículo cuando es acelerado hasta alcanzar 70km/h el PN se incrementa hasta un punto máximo, pero al mantener constante esta velocidad el consumo de combustible y por lo tanto el PN se optimizan con un comportamiento lineal respecto a la potencia, finalmente cuando se desacelera el bus las PN caen a cero al igual que la potencia del motor pero no de manera lineal.

Otras condiciones en el motor y el vehículo que tienen influencia sobre el aumento del PN dentro de los gases de escape generados por buses que utilizan motores diésel Detroit serie 40 con SCR, fueron determinadas por Sonntag & Oliver Gao (2009), los cuales, mediante métodos estadísticos, encontraron que el aumento de los parámetros de carga en el motor, la velocidad del motor, y la temperatura de escape aumentan la generación de PN. Por otra parte, la potencia específica del vehículo y la velocidad del vehículo fueron los parámetros globales del vehículo que resultaron ser significativos para la generación de PN. Los parámetros del vehículo permiten realizar estimaciones del PN en ausencia de los parámetros del motor, pero con una pérdida en el poder predictivo.

Otros factores que influyen en las condiciones del motor fueron estudiados por Alam & Hatzopoulou (2014), quienes estimaron las emisiones de CO<sub>2</sub>eq y PM<sub>2.5</sub> (Material Particulado de diámetro 2.5µm) generado por el uso del combustible diésel convencional y GNV, junto con diversas propuestas de variación en las operaciones de los buses tales como la Prioridad en las Señales de Tránsito (TSP), reubicación de las paradas de bus y los carriles para salto de tráfico, bajo diversos niveles de congestión. Los resultados arrojaron que el TSP por sí solo puede reducir las emisiones en un 14% y cuando se combina con el uso del GNV se consigue una reducción de 23%; la reubicación de las paradas de autobús a mitad de cuadra y los carriles para salto de tráfico pueden reducir las emisiones entre 9% y 15% respectivamente, sin embargo no son eficaces para vías poco congestionadas; finalmente, la implementación simultánea de las 3 alternativas operacionales pueden reducir las emisiones en un 18% si se ejecuta en vías congestionadas, pero si se utiliza GNV una reducción adicional de CO<sub>2</sub>eq podría estar entre 8% y 12% en comparación con el combustible diésel convencional y podría aumentar a un 16% con altos niveles de congestión en el tráfico, además las emisiones de PM<sub>2.5</sub> se reducirían entre un 85% y 93%.

Finalmente, la exposición de GEI al interior de los buses que genera un sistema de transporte público como el BRT fue estudiada por Wöhrnschimmel et al. (2008) quienes, mediante modelos de regresión por mínimos cuadrados, midieron la cantidad de monóxido de carbono (CO), benceno, compuestos orgánicos volátiles (VOc), y partículas en suspensión PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> (Material Particulado de diámetro 10µm) antes y después de que se implementara el sistema BRT diésel en la Ciudad de México en junio de 2005. Obtuvieron que el sistema de BRT

disminuyó entre un 20% y 70% la exposición de CO, benceno y PM<sub>2.5</sub> en los usuarios del sistema, aunque no se observaron reducciones significativas en la exposición de PM<sub>10</sub>.

Desde el punto de vista del tipo de combustible, McKenzie & Durango-Cohen (2012) estimaron las emisiones de CO<sub>2</sub>eq asociadas a la fabricación y el funcionamiento (ciclo de vida) mediante un análisis híbrido IO (de entradas y salidas) en cuatro tipos de buses que están siendo considerados para su utilización en los EE.UU: diésel ultra bajo en azufre, GNV, híbrido diésel-eléctrico y las celdas de hidrógeno (HFC). Obtuvieron que el GNV (emisor de 807ton de CO<sub>2</sub>eq) y los buses híbridos (754ton y 826ton de CO<sub>2</sub>eq para el híbrido diésel-eléctrico y HFC respectivamente) tienen menores emisiones de gases de efecto invernadero en su ciclo de vida que los buses diésel (979ton de CO<sub>2</sub>eq), sin embargo estos ahorros en las emisiones conllevan un incremento en los costos, especialmente los de capital. El bus que utiliza GNV requiere menores costos para la reducción de sus emisiones en comparación con el un bus diésel (un poco menos de US \$100 por tonelada de CO<sub>2</sub>eq), mientras que los buses HFC pueden proporcionar una mayor disminución en las emisiones, sobre todo cuando el combustible puede ser producido a partir de energías renovables.

De manera más específica, Hajbabaei, Karavalakis, Johnson, Lee, & Durbin (2013) evaluaron el impacto que tiene la composición del GNV sobre las emisiones de gases escape en motores de trabajo pesado dedicados a GNV ensamblados en buses de tránsito urbano. Los resultados mostraron que la composición del combustible influyó fuertemente en la generación gases de escape de los buses más viejos que funcionan con una mezcla de aire y combustible pobre. El GNV con bajo contenido de metano mostró mayor emisión de NO<sub>x</sub> y NMHC (non-methane hydrocarbon) y menor emisión de THC (total hydrocarbon), CH<sub>4</sub>, y formaldehídos, además de una mayor economía de combustible sobre una base volumétrica; por otro lado se encontró que los diferentes contenidos de etano, propano y butano presentes en el GNV no tienen influencias sobre el contenido de partículas presentes en los gases de escape.

Finalmente, y teniendo en cuenta que un vehículo puede tener diversas combinaciones entre tipos de motores y sistemas de postratamiento, Cooper, Arioli, Carrigan, & Lindau (2014) estudiaron algunas de ellas con el propósito de predecir las posibles cantidades de elementos nocivos como el NO<sub>x</sub>, PM y CO<sub>2</sub> que se generen en vehículos que probablemente se implementen en los próximos años en la India y Brasil. Esto se realizó mediante una



recopilación de datos proveniente de pruebas estándares de emisiones, ciclos de conducción y pruebas localizadas de carretera, y se determinó que las emisiones más nocivas como el NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub> con respecto a las PM pueden ser reducidas para cumplir el rango de emisión Euro V mediante la combinación del combustible biodiesel B100 y el uso de elementos como el filtro de partículas (DPF) y un SCR, mientras que el rango Euro IV puede ser cumplido solo por la combinación de combustible GNV y el Catalizador de Tres Vías (3WC).

Además se observó en un motor ISLG 280 que la composición del gas utilizado no tiene una influencia tan marcada sobre el comportamiento de los gases de escape, debido a que cuenta con un sistema de recirculación de gases de escape (EGR por sus siglas en inglés) y un proceso de Reducción Catalítica Selectiva (SCR), sin embargo se pudo determinar que es un importante generador de CO y NH<sub>3</sub> en comparación con los otros dos motores más antiguos (C-Gas Plus y John Deere 6081HF), disminuye fuertemente las emisiones de NO<sub>x</sub>, THC, NMHC, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y PM, y al igual que lo indicado por Hajbabaei et al. (2013) se observó que el uso de GNV con menor contenido de metano mejora la eficiencia de combustible del motor.

## 2.3 Impactos sobre el consumo de combustible

Holmberg, Andersson, & Erdemir (2012) han listado y determinado las proporciones globales de energía consumida por factores asociados al funcionamiento del vehículo y las pérdidas por fricción de camiones de una sola unidad, semirremolques, automóviles y buses inter urbanos, los cuales se resumen de la siguiente manera:

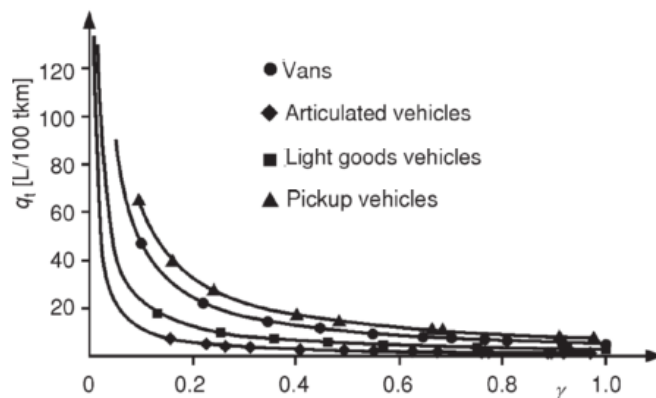
- 30% (22%-31%): Pérdidas de energía a través de los gases de escape en forma de calor.
- 20% (20%-25%): Pérdidas de energía por calor liberado en el proceso de combustión.
- 3% (1%-6%): Pérdidas auxiliares que no se deben a fricción.
- 47% (36%-54%): Energía convertida en potencia mecánica y se divide en 2:
  - 13,5% (5%-26%): Pérdidas por resistencia al aire.
  - 33,5% (30%-37%): Pérdidas por fricción asociadas a otros componentes como:
    - 18%: Sistemas internos del motor como pistones, bombas, etc.
    - 42% (17%-52%): Contacto entre las ruedas y la carretera.
    - 13%: Sistema de transmisión.

- 18%: Contacto de los frenos.
- 9%: Equipo auxiliar.

Del total de energía consumida solo un 34% se utiliza para realizar un trabajo útil, esto es relativamente poco en comparación con el total de las pérdidas y ha motivado el desarrollo de nuevas tecnologías en los motores, la conducción eficiente, la elección adecuada de rutas basada en la información acerca de las condiciones del plan de viaje y de tráfico, y la logística eficiente que incluye optimización de los pesos y volúmenes de carga con diferentes clases de vehículos o tamaños del compartimiento de carga, con el propósito de alcanzar una mejor optimización en el consumo de combustible (Vujanovic et al., 2010).

En este sentido, Correa Espinal, Cogollo Flórez, & Salazar López (2010) mediante un diseño de experimentos implementado a un vehículo de carga de mercancía con motor Cummins ISX 475, realizaron un análisis a diversas variables asociadas al proceso de conducción con el fin de conocer los niveles de influencia que tienen sobre el consumo de combustible específico y las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Su investigación arrojó que las variables tiempo en mínima (o ralentí), tiempo en velocidad de cruce y tiempo en el último cambio representan el 74,02% de la variabilidad experimentada en el consumo de combustible, las cuales pueden ser controladas mediante el entrenamiento a los conductores y pueden lograr mejoras de hasta el 22,5% en el rendimiento del combustible siempre que logre las proporciones adecuadas de las variables explicativas.

Vujanovic et al., (2010) han realizado una serie de pruebas experimentales en buses articulados, camionetas, automóviles y furgonetas con el fin de comprobar la hipótesis de que el consumo específico de combustible  $q$  (L/100km) depende directamente del factor de carga ( $\gamma$ ). El factor de carga es definido como la proporción de ocupación de un vehículo, es decir, la cantidad de carga en kg que se le ha asignado respecto a la cantidad de carga total en kg que puede transportar. Sus resultados arrojaron que estas dos variables no son proporcionales y que el impacto del factor de carga sobre el consumo de combustible es más sensible cuando se analiza contra el consumo específico de combustible por carga transportada  $q_i$  (L/100tkm, donde tkm es tonelada (t) por kilómetro (km)), en la Figura 2 se muestra gráficamente el comportamiento de esta relación donde se identifica que a mayor ocupación de los vehículos menor es el combustible utilizado para transportar 1 tonelada de carga.



**Figura 2:** Relación entre el consumo específico de combustible por carga transportada  $q_t$ (L/100tkm) y el factor de carga ( $\gamma$ ). (Fuente: Vujanovic et al., 2010).

Mohamed-Kassim & Filippone (2010) evaluaron la reducción en el consumo de combustible en función de la reducción en el coeficiente de arrastre proporcionado por la resistencia del aire mediante una metodología basada en un modelo general de las fuerzas involucradas en el gasto energético de los vehículos. La investigación se desarrolló con dos vehículos de masa diferente (20ton y 40ton) en rutas urbanas e inter urbanas, en los cuales se instalaron los siguientes dispositivos a fin de modificar el coeficiente de arrastre a través del cambio en el área frontal y laterales:

- Carenado superior.
- Carenado delantero del remolque.
- Faldones para el cabezote.
- Faldones para el remolque.
- Deflector trasero.
- Carenado frontal.

Para las condiciones de su estudio se obtuvo que una reducción del 10% en el coeficiente de arrastre del camión de 40ton representó una reducción en el consumo de combustible del 1,5% en una ruta urbana, y un 3,8% para una ruta inter urbana, mientras que para un camión de 20ton, un 10% en la reducción del coeficiente de arrastre produjo una reducción en el consumo de combustible de 2,5% para una ruta urbana, y un 5,2% en una inter urbana. En pocas

palabras se demostró que a mayores velocidades de operación mayor va a ser el efecto de la resistencia del aire sobre el consumo de combustible, mientras que los vehículos urbanos que viajan a menores velocidades y frecuentes detenciones existe un mayor efecto por el vencimiento de la inercia y cantidad de aceleraciones.

Mahendra & Rao (2004) estudiaron la relación existente entre la carga, la presión de los neumáticos, la resistencia a la rodadura y sus efectos en el consumo de combustible. Los resultados arrojados indican que la resistencia a la rodadura  $R$  es proporcional a la carga  $W$ , de tal manera que si la carga aumenta al doble entonces la resistencia a la rodadura se duplicará también. Por otro lado, la relación entre la resistencia a la rodadura  $R$  y la presión de los neumáticos  $P$  es inversamente proporcional. Adicionalmente se determinó que la resistencia a la rodadura y el consumo de combustible tienen una dependencia significativa, de tal manera que una reducción entre el 3-4% en la resistencia a la rodadura de una llanta para camión representa una reducción del 1% en el consumo de combustible, mientras que una reducción entre el 5-7% de la resistencia a la rodadura de una llanta para bus urbano va a representar el 1% en reducción del consumo de combustible. Finalmente, un incremento de la resistencia a la rodadura del 100% va a significar un aumento en el consumo de combustible de 25-30%.

Mantener condiciones adecuadas de temperatura y humedad al interior de un bus son importantes en términos de confort y la salud para los pasajeros, sin embargo demandan una importante cantidad de energía en los vehículos. De Lieto Vollaro et al. (2014) proponen entonces optimizar la energía consumida por los sistemas de aire acondicionado utilizado en los buses de transporte público mediante una simulación de la transferencias de calor presentes en la carrocería. Determinaron que el 15,84% de la energía consumida por este tipo de componentes auxiliares puede ser reducida en los días de verano mediante el uso de vidrios con valor de transmitancia térmica igual a  $0,98W/m^2K$  y un factor solar  $g$  igual a  $0,44$ , además de una pintura de alta reflectancia en el exterior que puede ser de color blanco. Los costos de implementación de estos equipos pueden ser significativos, sin embargo estimaron un 20% de ahorro anual en combustible diésel, lo que representa además una disminución de  $1464kg/año$  en emisiones de  $CO_2$  a la atmósfera.

Como síntesis integral a los tres enfoques anteriores, se puede decir que existe una fuerte dependencia entre el desempeño de las flotas, la emisión de GEI y el consumo de combustible,

ya que la implementación de sistemas de transporte como el BRT u otros como el metro o LRT tienen ventajas de movilidad especialmente en reducción de tiempos de viaje y alta capacidad, lo que bien acogido y permite transportar mayor cantidad de personas con un uso más óptimo de la infraestructura y vehículos, reflejándose en menores consumos de combustible y por ende reducción de los GEI. De igual manera, motores más eficientes y el uso combustibles no convencionales pueden mejorar el consumo de combustible tal como lo demostraron McKenzie & Durango-Cohen (2012) y Hajbabaei et al. (2013), además de reducir significativamente los GEI junto con equipos periféricos tales como los estudiados por Cooper et al. (2014). Finalmente, la implementación de actividades y dispositivos buscando mayor aerodinámica u otras características que reducen el consumo de combustible van a generar automáticamente reducciones en los GEI, además de los costos asociados. En el Anexo 1 se hace un recuento de las investigaciones revisadas.

## Contextualización

Los sistemas de transporte público tienen como principal objetivo disminuir la congestión vial, accidentalidad, contaminación, y encontrar el mejor balance entre el bienestar de los usuarios (tiempos y calidad de viaje) y los costos de operación del sistema. El punto óptimo entre el bienestar y costos de operación puede lograrse a través de un sistema de gestión de flota centralizado que posea la información y recursos necesarios para tomar decisiones orientadas a optimizar rutas de manera efectiva y en tiempo real, lo que se traduce en menores costos de operación del sistema, y en un diseño y unas frecuencia de tránsito de rutas que respondan al bienestar de los usuarios y no a los beneficios particulares de un operador (Yepes, 2013).

Los sistemas BRT se alinean perfectamente con los objetivos de transporte público dado a que sus esquemas contractuales y la prestación del servicio se encuentran generalmente encabezados por una entidad (en su mayoría pública), además ofrecen ventajas muy similares al de otros sistemas como los férreos que los hacen muy competitivos y aceptados, algunas de ellas son:

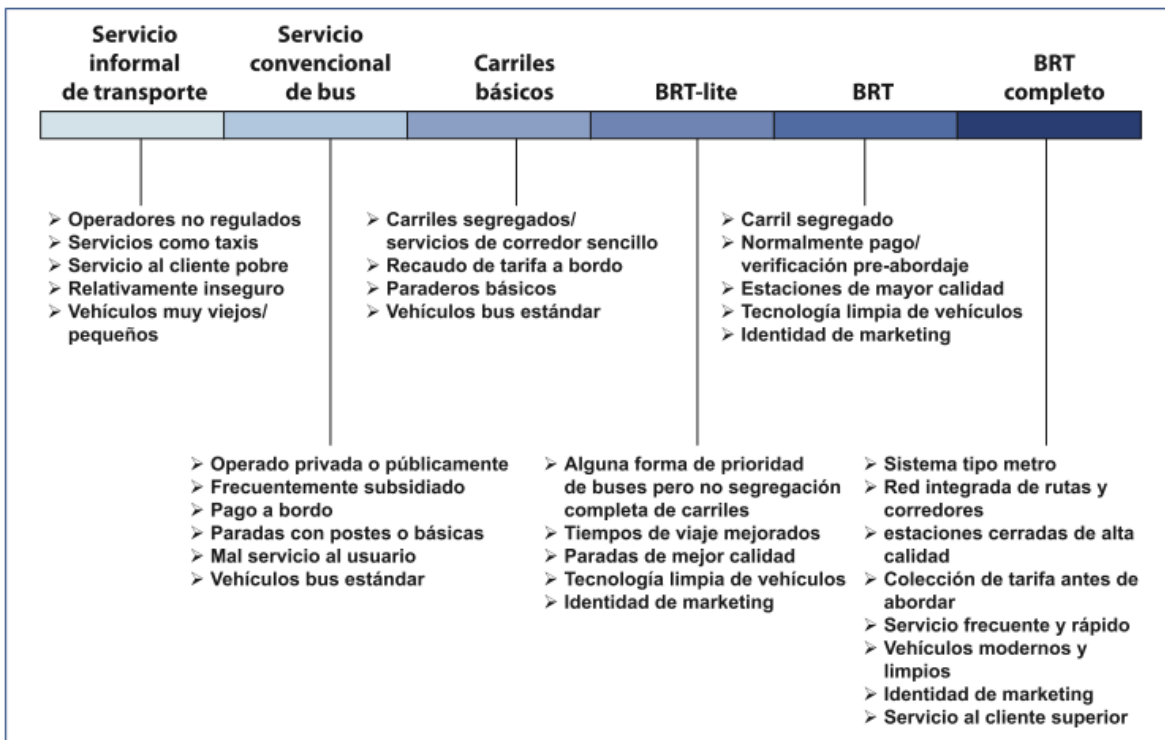
- Infraestructura física:
  - Carriles exclusivos.
  - Existencia de una red integrada de rutas y corredores.
  - Estaciones mejoradas que son convenientes, cómodas, seguras y protegidas a condiciones climáticas.
  - Estaciones que dan acceso a nivel entre la plataforma y el piso del vehículo.
  - Estaciones especiales y terminales que facilitan la integración física fácil entre rutas troncales, servicios de alimentación y otros sistemas de transporte masivo.
  - Mejoras del espacio público circundante.

- Operaciones:
  - Servicio frecuente y rápido entre orígenes y destinos principales.
  - Capacidad amplia para demanda de pasajeros a lo largo de los corredores.
  - Abordaje y desembarque rápido de pasajeros.
  - Recaudo y verificación de la tarifa antes de abordar.
  - Integración de tarifa entre rutas, corredores y servicios alimentadores.
  
- Estructura de negocios e institucional:
  - Entrada al sistema restringida a operadores prescritos bajo un negocio y estructura administrativa reformada (es decir, un sistema cerrado).
  - Procesos licitados competitivamente y totalmente transparentes para adjudicación de contratos y concesiones.
  - Gestión eficiente que resulta en la eliminación o minimización de subsidios del sector público hacia la operación del sistema.
  - Sistema de recaudo de la tarifa operado y gestionado independientemente.
  - Seguimiento del control de calidad por parte de una entidad o agencia independiente.
  
- Tecnología:
  - Tecnologías de vehículos de bajas emisiones.
  - Tecnologías de vehículos de bajo ruido.
  - Tecnología de recaudo y verificación de tarifa automática.
  - Gestión del sistema a través de un centro de control centralizado, utilizando aplicaciones de Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) tales como localización automática de vehículos.
  - Prioridad semafórica o separación de nivel en intersecciones.
  
- Mercadeo y servicios al cliente:
  - Identidad distintiva para el sistema.
  - Excelencia en servicio al cliente y provisión de facilidades clave para los usuarios.

- Facilidad de acceso entre el sistema y otras opciones de movilidad (tales como personas a pie, bicicletas, taxis, transporte colectivo, vehículos motorizados privados, etc.).
  - Infraestructura especial para facilitar el acceso a grupos en desventaja física, tales como los niños, personas de la tercera edad y los discapacitados físicamente.
  - Mapas de rutas, señalización y/o pantallas de información en tiempo real claros que son localizados de manera visible dentro de estaciones y/o vehículos (ITDP (Institute for Transportation & Development), 2010).
- Otros:
    - Los costos de implementación pueden ser entre 4-20 veces menos que un sistema LRT y entre 10-100 veces menos que un metro para la misma capacidad relativa de transporte de pasajeros.
    - Posibilidad de implementación incremental para ajustarse financieramente al crecimiento y la demanda del servicio.
    - El cambio en el uso de la tierra ya que las zonas construidas puedan ser remodeladas de acuerdo a los planes de ordenamiento territorial de manera más fácil (Hensher, 2007).

Sin embargo, no todos los sistemas BRT existentes son iguales y tienen las mismas ventajas descritas anteriormente por razones como las preferencias locales, cultura, densidad poblacional, distribución de viajes, clima, geografía, topografía, recursos financieros disponibles, capacidad y conocimiento técnico local, y tal vez lo más importante, el grado de voluntad política para implementar un sistema de alta calidad; por lo tanto este tipo de sistemas se ha categorizado como BRT-lite, BRT y BRT completo, en la Figura 3 se muestran algunas de sus características principales que además pueden ser comparadas con otros sistemas convencionales que han sido también categorizados como Servicio informal de transporte, Servicio convencional de bus y Carriles básicos.





**Figura 3:** Espectro de calidad sobre el transporte público sobre llantas. (Fuente: ITDP (Institute for Transportation & Development), 2010).

En los años 90', Colombia en tema de movilidad presentaba serias deficiencias en las principales ciudades las cuales se asociaban a la sobreoferta, rutas y operaciones inadecuadas, equipos obsoletos, deficiente calidad e insostenibilidad de la infraestructura vial. A raíz de esto el Gobierno Nacional formula una política pública de transporte urbano orientada hacia la atención de las necesidades de movilidad de la población bajo criterios de eficiencia operativa, económica y ambiental, a través de dos estrategias: La primera aplicaba a las ciudades con menos de 600 mil habitantes y consistía en reorganizar el funcionamiento del transporte público e implantar medidas de gestión de tráfico, y la segunda exigía a las ciudades que superaran los 600 mil habitantes el desarrollo de sistemas de transporte masivo basados en la experiencia (exitosa) del sistema integral de transporte masivo Transmilenio que había iniciado operaciones el año 2000 en Bogotá.

En esta política además fueron vinculados inversionistas privados y esquemas de cofinanciación con límites de participación para la Nación y sus entidades descentralizadas en un rango que varía entre mínimo el 40% y máximo del 70% del servicio de la deuda de cada

proyecto. Así pues, nace lo que son ahora los Sistemas Integrados de Transporte Masivo (SITM) incluidos en diversas ciudades como Bucaramanga, Barranquilla, Pereira, Cali, Cartagena, Bogotá y Medellín, algunas de ellas con sistemas BRT y otras multimodales con las características que se describen a continuación. (Contraloría general de la República, 2010).

### **3.1 Medellín y su sistema multimodal**

Gracias a la asociación entre el Municipio de Medellín y el Departamento de Antioquia se funda en 1979 un ente denominado Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá (ETMVA) – Metro Ltda., encargado de llevar a cabo la construcción, administración y operación de un sistema de transporte masivo destinado a generar desarrollo y mejorar la calidad de vida de los habitantes del Valle de Aburrá.

Desde el momento en que se crea Metro Ltda. inicia la elaboración de estudios de factibilidad técnica y económica, los cuales fueron realizados por la firma Mott, Hay & Anderson Ltda., ya para el año 1980 el proyecto es sometido a consideración del Gobierno Nacional y su Consejo Nacional de Política Económica y dan su aprobación en diciembre de 1982. Ese año se autoriza al Metro la contratación externa del 100% de los recursos necesarios para la obra y en 1984 se contrata la construcción con firmas alemanas y españolas ([metrodemedellin.gov.co](http://metrodemedellin.gov.co)).

El 30 de noviembre de 1995 se da inicio a la operación comercial en un primer tramo, entre las estaciones Niquía y Poblado de la Línea A; luego la red se extendió hasta La estrella y al Occidente con seis estaciones en la Línea B; el 7 de agosto de 2004 entró en funcionamiento la Línea K, Metrocable del nororiente, y el 3 de marzo de 2008 inicia el servicio del segundo Metrocable Línea J, que atiende sectores del occidente de Medellín.

En febrero de 2010 se puso en servicio la primera línea turística, Cable Arví, Línea L, al oriente cercano; el 22 de diciembre de 2011 inicia la operación de la Línea 1 de buses articulados, y en el 2013 empieza a operar la línea 2 de buses padrones; y finalmente, 30 de marzo el tranvía de Ayacucho ([metrodemedellin.gov.co](http://metrodemedellin.gov.co)).

La empresa Metro de Medellín es un ejemplo de sistema de transporte masivo multimodal porque ella misma utiliza más de un medio de transporte diferente para llevar personas desde

un punto de abordaje hasta su destino; esta combina para su operación sistemas férreos, teleféricos, tranvía y buses BRT, actualmente el primero cuenta con 78 trenes, dos líneas que suman una longitud total de 31,3km y 27 estaciones; el segundo llamado Metrocable cubre dos rutas con tres estaciones cada una, la línea J que tiene 2,9km hacia el occidente de la ciudad y la línea K con 2km hacia el nororiente; el tercero llamado Tranvía de Ayacucho cuenta con 60 coches divididos en 12 tranvías y 4km de recorrido hacia el oriente, y el cuarto es el sistema BRT que cuenta con 30 buses articulados y 47 padrones para atender el occidente y nororiente de la ciudad (ver Figura 4).

### **3.1.1 Sistema BRT de Medellín**

El Metro de Medellín es la empresa que administra la operación de este sistema BRT, además de su mantenimiento, conducción y otros requerimientos que se necesitan para su adecuado funcionamiento mediante procesos licitatorios. Por su parte, la empresa Metroplús es la encargada del mantenimiento y desarrollo de su infraestructura.

La operación de esta la flota de buses se desarrolla en dos rutas nombradas Línea 1 y Línea 2 (L1 y L2 respectivamente en adelante), la primera es exclusiva con una longitud de 12,5km y 20 estaciones y la segunda con una longitud de 18,0km que tiene un tramo mixto que se comparte con otros vehículos y 22 estaciones, ambas convergen en la estación Hospital y desde allí hasta Aranjuez se atiende una zona nororiental; actualmente tiene 30 buses articulados y 47 padrones dedicados a GNV que movilizan diariamente unos 135 mil pasajeros diariamente ([metrodemedellin.gov.co](http://metrodemedellin.gov.co)). En la Figura 4 se muestra además de las rutas de todo el sistema Metro algunos indicadores operacionales.

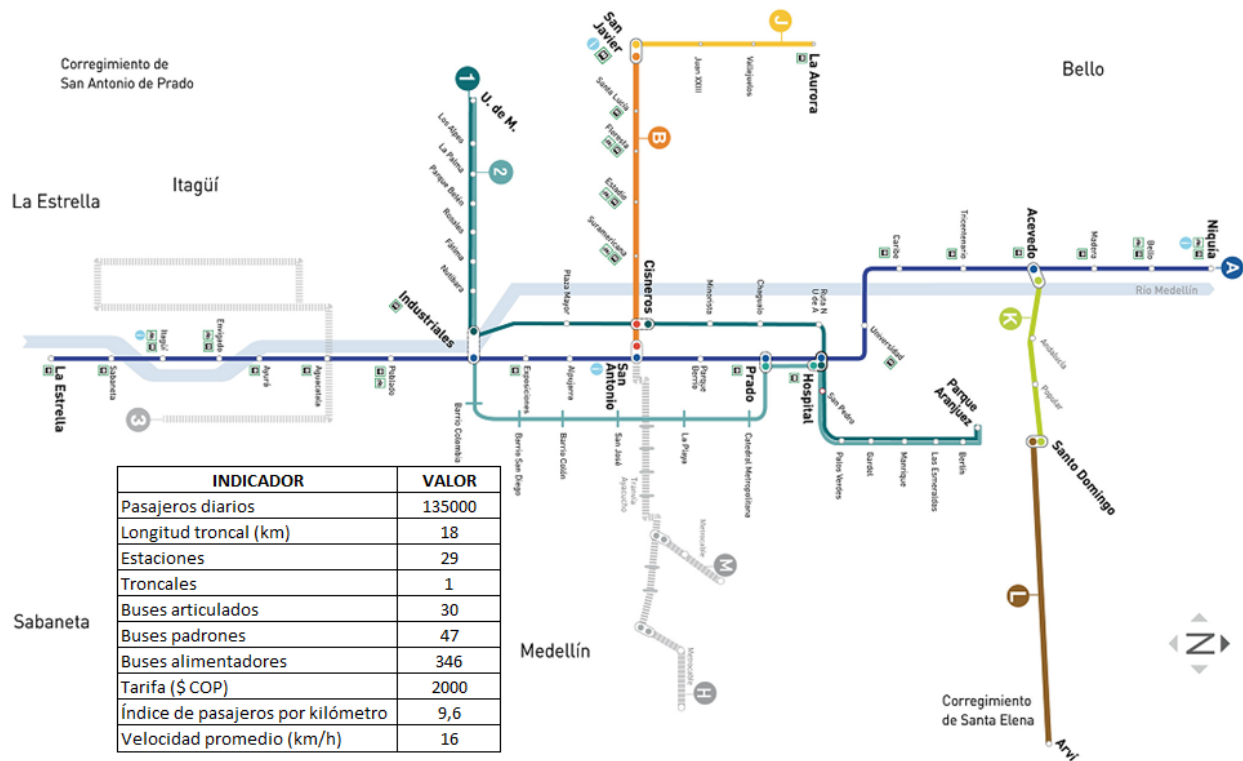


Figura 4: Mapa del SITM de Medellín.

Fuente: Elaboración propia a partir de (metrodemedellin.gov.co)

### 3.2 Bucaramanga

Metrolinea es la empresa encargada de todas las actividades previas, concomitantes y posteriores, para construir, operar y mantener el sistema integrado de transporte masivo de pasajeros para Bucaramanga y su área metropolitana, además de llevar a cabo la construcción y puesta en funcionamiento del Sistema Integrado de Transporte Masivo que incluye el diseño operacional y la planeación del mismo y todas las obras principales y accesorias necesarias para la administración y operación eficaz y eficiente del servicio de transporte masivo de pasajeros.

Este sistema (ver Figura 5) cuenta con una troncal que tiene 9km de longitud y posee 17 estaciones que conecta el centro de Bucaramanga con Piedecuesta, además de 9 rutas pretroncales y 21 rutas de alimentadores por donde transitan 224 buses alimentadores, 252 padrones y 39 articulados, todos ellos con motores diésel que mueven diariamente 72 mil pasajeros (Metrolinea, n.d.).

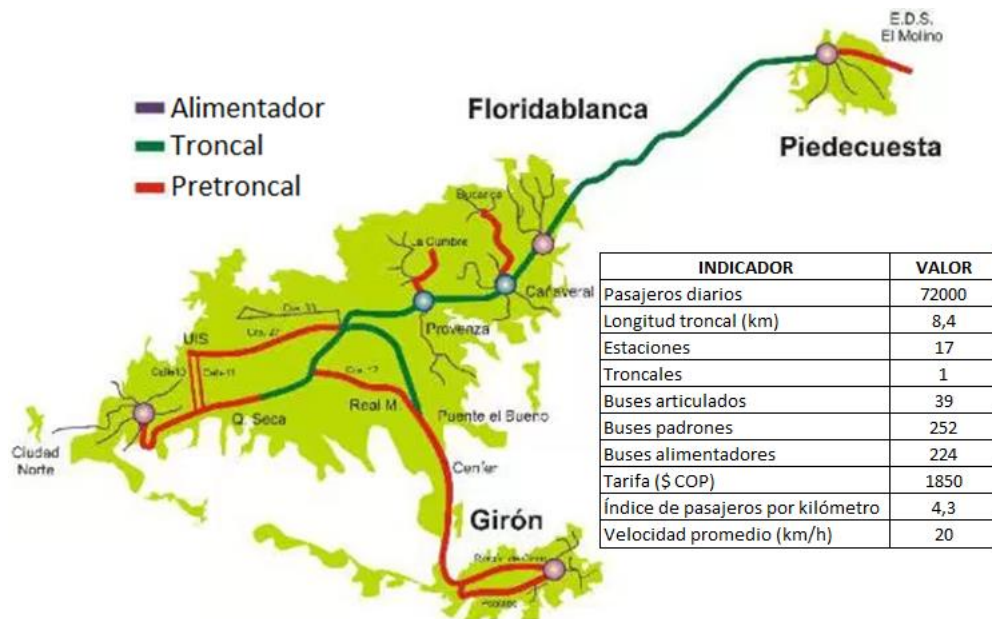


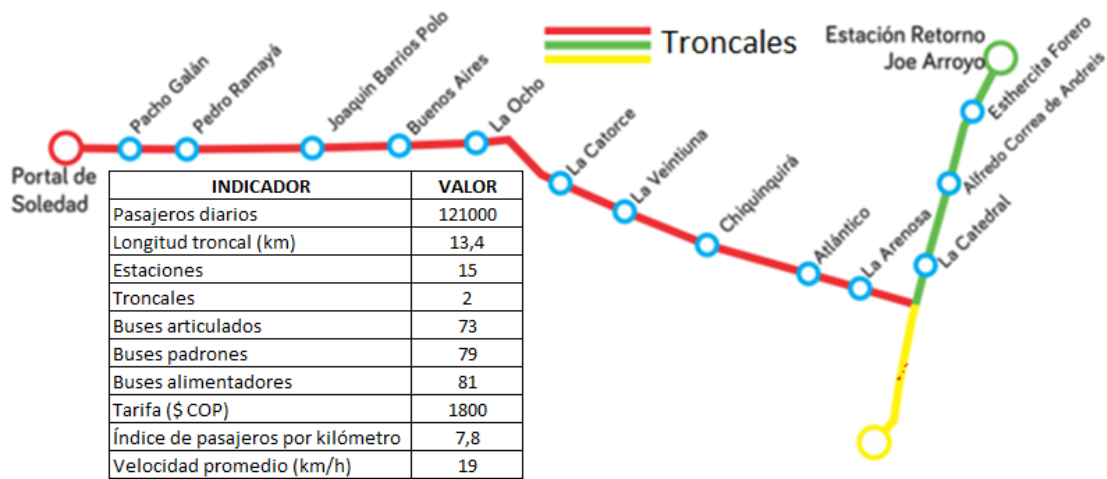
Figura 5: Mapa del SITM de Bucaramanga.

Fuente: Elaboración propia a partir de Yepes (2013) y Metrolinea (n.d.).

### 3.3 Barranquilla

Transmetro es el encargado de ofrecer la concesión para la operación mediante procesos licitatorios, actualmente los llevan a cabo dos contratistas: la Unión Temporal Sistrur – Transurbanos a quien corresponde el 60% de la operación del sistema y al Grupo Empresarial Metrocaribe el restante 40%.

El sistema cuenta con dos troncales que forman una “T” ubicadas en los corredores de mayor demanda. La troncal Murillo (en rojo) tiene 9,5 Km de longitud y conecta la ciudad de sur a norte con el municipio de Soledad, y la troncal Olaya Herrera (en verde y amarillo) tiene una longitud de 4,9 Km y conecta el oriente con el occidente de la ciudad (Figura 6). En este sistema transitan 81 buses alimentadores, 79 padrones y 73 articulados con motores diésel que mueven diariamente 84 mil pasajeros (Transmetro, n.d.).



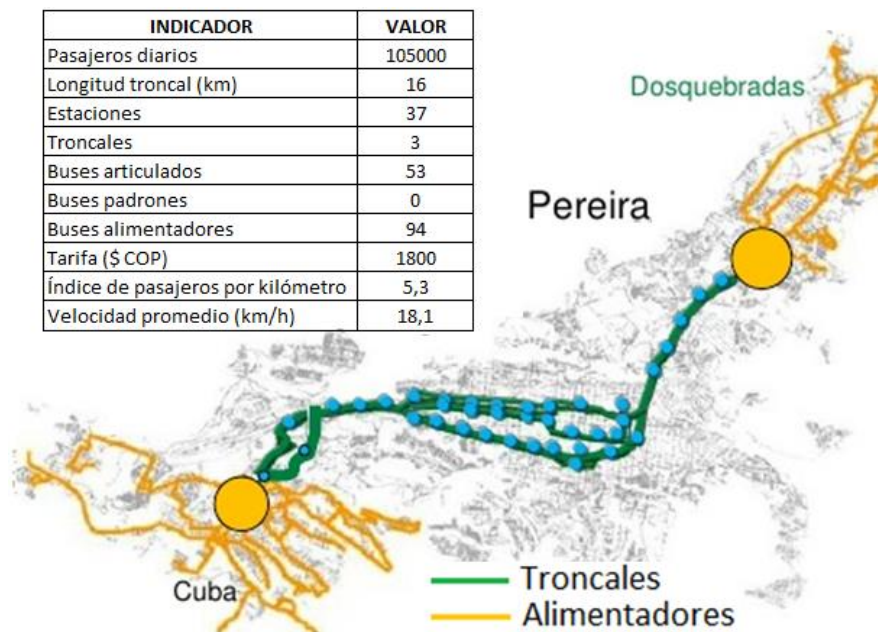
**Figura 6:** Mapa del SITM de Barranquilla.

Fuente: Elaboración propia a partir de Yepes (2013) y Transmetro (n.d.).

### 3.4 Pereira

Megabús es el ente que se encarga de ofrecer la concesión para la operación del sistema que actualmente tiene por licitación la empresa Promasivo S.A. con una participación del 63% y está responsabilizada de operar el sistema a partir de la cuenca Cuba; e Integra S.A. que tiene una participación del 37% y opera el sistema a partir de la cuenca Dosquebradas (Yepes, 2013).

El sistema atraviesa la ciudad desde el sector de Cuba y llega a Dosquebradas. Cuenta con 31 rutas alimentadoras y tres troncales de vías exclusivas que suman en total 17,6km ubicadas de manera paralela tal como se muestra en la Figura 7. Para la operación se cuenta con 94 buses alimentadores y 53 articulados con motores diésel que transportan a 105 mil pasajeros diariamente (Megabus, n.d.).



**Figura 7:** Mapa del SITM de Pereira.

Fuente: Elaboración propia a partir de Yepes (2013) y Megabús (n.d.).

### 3.5 Cali

MIO cuenta con un ente gestor llamado Metro Cali S.A, el cual tiene contratos para la operación de los buses con cuatro empresas: Blanco y Negro Masivo con una participación del 29% en la oferta, el Grupo integrado de Transporte GIT con el 33%, Unimetro con el 18% y la Empresa de transporte masivo con el 20% restante (Yepes, 2013).

Este sistema cubre el 89,8% del territorio de la ciudad y cuenta con 5 troncales, una longitud total de 39km y 56 estaciones tal como se muestra en la Figura 8. Para la operación se utilizan 152 buses alimentadores, 492 padrones y 182 articulados con motores diésel que transportan 530 mil pasajeros diariamente.

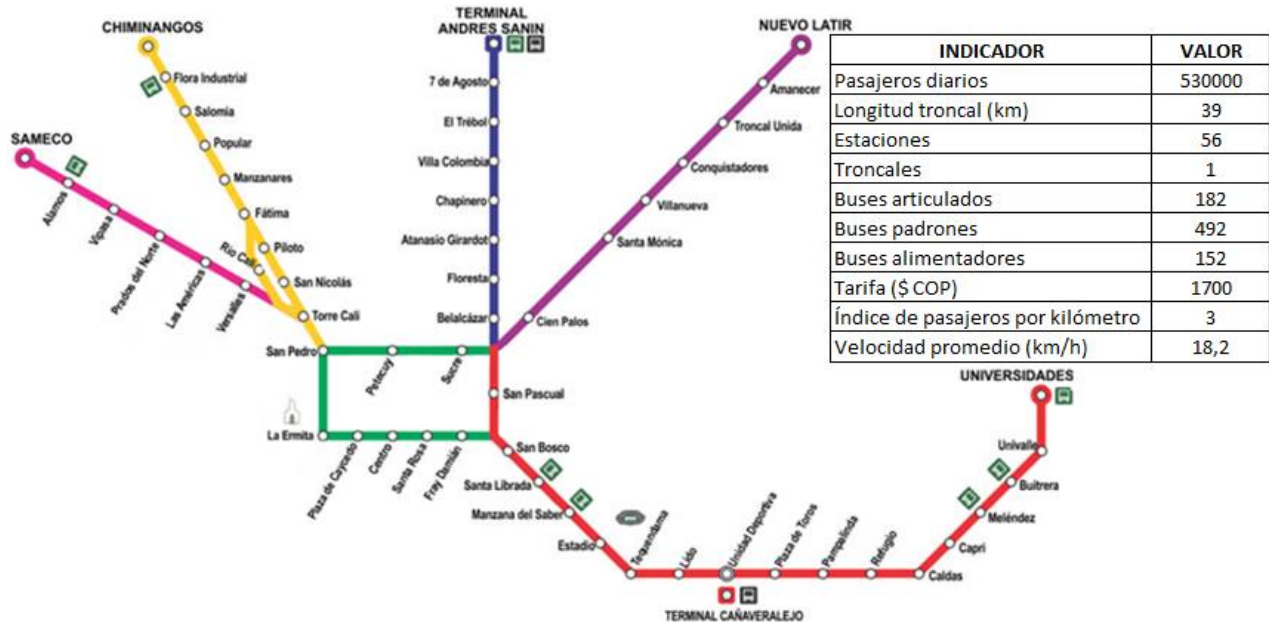


Figura 8: Mapa del SITM de Cali.

Fuente: Elaboración propia a partir de Yepes (2013) y Mio (n.d.).

### 3.6 Bogotá

TransMilenio se ha denominado el único real BRT completo (o full BRT) que existe, debido a su amplia cobertura y sus características de servicio que es liderado totalmente desde la ciudad, fue exitoso porque logró impactos positivos en términos de movilidad a costos considerablemente menores a los del metro. La centralización para la optimización de rutas y el recaudo se transformaron en el eje de los ahorros de costos y reducción de tiempos (Yepes, 2013).

A la fecha, TransMilenio tiene 11 corredores troncales que suman una longitud total de 112,9km (Figura 9) y transporta alrededor de 2,2 millones de pasajeros al día en buses con motor diésel. Su capacidad ha alcanzado hasta 40mil pasajeros/hora/sentido, lo cual es superior a una gran cantidad de sistemas férreos del mundo, aunque de la misma manera que en éstos, se ha logrado con unas tasas de ocupación en los vehículos de 6 personas por metro cuadrado (Pardo, 2009).





**Figura 9:** Mapa del SITM de Bogotá.

Fuente: Elaboración propia a partir de Yepes (2013).

# **Caracterización del sistema BRT de Medellín**

La caracterización del sistema BRT es necesaria para el planteamiento del sistema de gestión de la energía y por ende se describen a continuación tres elementos que definen las condiciones actuales de la operación. En el primero de ellos se muestran las principales características de los buses y de la ruta, en el segundo se describen los diferentes programas de gestión utilizados para mantener y operar los buses, y en el tercero la demanda del servicio.

## **4.1 Características técnicas de los buses y la ruta**

Como se ha indicado anteriormente, la flota está constituida por dos tipos de buses que son Padrones y Articulados, en los Articulados se encuentran dos modelos que se diferencian principalmente por algunas características técnicas del motor ya que 20 de ellos tienen motor Cummins (en adelante Articulado BLK) y los 10 restantes motor Doosan (en adelante Articulado ZT). En la Tabla 2 se muestran las principales características técnicas de estos tres tipos de buses.

**Tabla 2:** Principales características técnicas de los buses Articulado BLK, Articulado ZT y Padrón.

	<b>ARTICULADO BLK</b>	<b>ARTICULADO ZT</b>	<b>PADRON</b>
Marca motor	Cummins	Doosan	Cummins
Modelo motor	ISLG 2180	GL11K	ISLG 2180
Potencia motor [HP]	320@2000rpm	340@2100rpm	280@2000rpm
Torque max. [N.m]	1356@1300rpm	1392@1300rpm	1220@1300rpm
Rango de rpm en torque max. [rpm]	1300-1400	1200-1400	1300-1500
rpm max. [rpm]	2100	2100	2100
Combustible	GNV	GNV	GNV
Capacidad tanques GNV [l]	1080	1080	720
Capacidad pasajeros [und]	154	154	90
Masa admisible [kg]	30000	28000	19000
Marca transmisión	ZF	Allison	Allison
Modelo transmisión de velocidad	6AP 1400 B	T375R	T375R
Modelo convertidor de torque	W370-6-TP4 D	TC-421	TC-418
Multiplicación convertidor	2,32	1,77	1,98
Relación de cambio 1ra	3,364:1	3,49:1	3,49:1
Relación de cambio 2da	1,909:1	1,86:1	1,86:1
Relación de cambio 3ra	1,421:1	1,41:1	1,41:1
Relación de cambio 4ta	1,000:1	1,00:1	1,00:1
Relación de cambio 5ta	0,720:1	0,75:1	0,75:1
Relación de cambio 6ta	0,615:1	0,65:1	0,65:1
Relación de cambio reversa	4,235:1	5,03:1	5,03:1
Relación del diferencial	1:6,14	1:7,16	1:6,83

Adicionalmente, los buses cuentan con sistemas electrónicos que son controlados por computadoras a bordo llamadas ECU (Unidad de Control Electrónico por sus siglas en inglés) integradas a los principales sistemas que son el motor, transmisión de velocidades, articulación (aplica solo para buses Articulados), equipos de carrocería (luces, tablero, puertas, etc.), frenos, sistema de refrigeración (aplica solo para buses Articulados), equipos de Indra (que se encarga del conteo de personas y envío de información satelital a PCC (Puesto Central de Control)) y LAP (encargado del envío de información a PCC y usuarios con acceso a la plataforma lapflotas.com y qsrt.cumandes.com sobre el funcionamiento del motor, conducción y en general variables técnicas), con el propósito de controlar los diferentes componentes que integran cada sistema de manera sinérgica, protegerlos de malas prácticas de uso y garantizar

seguridad del equipo ante cambios anormales en las carreteras, condiciones ambientales, conducción, entre otros.

Dichos módulos se interconectan mediante un arnés eléctrico llamado CAN bus y utilizan un protocolo SAE J1939 para comunicarse entre ellos, es decir, comparten información acerca del funcionamiento de los componentes de cada sistema a través de su respectiva ECU. La línea CAN permite además una conexión para el diagnóstico de fallas y monitoreo de gran parte de las variables en tiempo real que se miden por los diferentes sensores integrados a los sistemas del bus tales como presión de aceite, temperatura del motor, rpm, velocidad vehicular, presión de admisión, temperatura de los gases de escape, etc., conexión que se logra a través de una interface que traduce el lenguaje SAE J1939 a un código que puede ser interpretado por un software instalado en un computador a bordo, aquellos que se utilizan actualmente en la flota son el Insite para el motor Cummins, el Scan200 para el motor Doosan, Diagnosis Wabco para el sistema de frenos, Allison Doc para la transmisión Allison y Testman para la transmisión ZF.

Por su parte, las rutas tienen algunas características importantes que resaltar además de lo que se ha indicado en el capítulo 3. La primera de ellas es que las líneas L1 y L2 tienen desde la estación Hospital (donde convergen) hasta Palos verdes un tramo de aproximadamente 400m con una pendiente de 15%, y del 16% entre Aranjuez y Berlín, donde además son tramos que normalmente ocupan los buses a su carga máxima durante las horas pico (mostradas más adelante). El restante tramo de ruta es relativamente plano y hay secciones que no superan el 6% de pendiente.

Adicionalmente, el sistema posee preferencia en los pasos semafóricos y vías exclusivas en toda la línea L1 y parte de la línea L2, en esta última hay un tramo mixto que va desde la estación Industriales hasta Hospital donde se comparte la vía con otros vehículos y debe cumplir con normalidad los sistemas de control de tráfico de la ciudad, por ende los buses allí están sometidos a detenciones y arrancadas mucho más constantes.

## **4.2 Programas de gestión**

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema de buses BRT de Medellín hace parte de un sistema de transporte masivo que exige a su administración la estructuración de unos

programas eficaces y eficientes que mantengan y mejoren la operación, confiabilidad y disponibilidad de los buses. En este sentido se han desarrollado 3 programas, el primero es la Gestión de los conductores, el segundo es el programa de Mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, y el tercero es la Programación de la operación. Los dos primeros han sido subcontratados mediante licitación pública y cada uno de ellos es administrado por una empresa diferente que son la Fundación Pascual Bravo y Equitel Buses respectivamente, el tercero es realizado propiamente por la empresa Metro de Medellín.

#### **4.2.1 Programa de gestión de los conductores**

Tiene como objetivo principal la contratación y suministro de personal idóneo y calificado para conducir los buses en servicio comercial, realización de pruebas de ruta y maniobras complejas, de manera tal que se salvaguarde la integridad física de los usuarios, peatones u otros agentes internos o externos al sistema, además de un manejo adecuado de los buses. Para ello se han establecido entonces dos figuras o especialidades para los conductores, la primera son los BOP (Operadores de bus, por sus siglas en inglés) que se encargan de operarlos en servicio comercial, y la segunda son los maniobristas encargados de hacer pruebas de ruta y maniobras complejas. Adicionalmente, la Fundación Pascual Bravo cuenta con un programa de capacitación que consiste en instruir de manera técnica y práctica a los conductores sobre la manipulación del tablero de control, indicadores de falla, lineamientos para la comunicación con PCC, conducción segura, entre otros.

Con el fin de garantizar la adecuada operación de los buses se han desarrollado unos indicadores que califican de manera individual a cada uno de los conductores, estos se gestionan a través de una plataforma virtual (que puede ser consultada en el link [lapflotas.com](http://lapflotas.com)) la cual es alimentada gracias a la medición de variables realizado por los sistemas electrónicos incorporados en cada bus y enviados de manera satelital hasta llegar a la plataforma virtual, donde se puede consultar dicha información en tiempo real. Las variables y límites condinatorios como se componen los indicadores utilizados se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3:** Indicadores de desempeño utilizados para los BOP y maniobristas.

<b>Variable</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Definición de variables</b>
Cantidad excesos RPM	rpm	Es la cantidad de veces que el motor superó 2200 rpm.
Cantidad de frenadas bruscas	und	Cantidad de veces donde la desaceleración fue igual o mayor a 10 km/hora en un segundo.
Cantidad de aceleraciones bruscas	und	Cantidad de veces donde la aceleración fue igual o mayor a 10 km/hora en un segundo.
Cantidad excesos de velocidad	und	Cantidad de veces que la velocidad sobrepasó el límite de velocidad máximo permitido (60 km/hora).
Tiempo en conducción	h	Tiempo donde el vehículo está encendido viajando a más de 5km/h.
Tiempo en detención	h	Tiempo donde el vehículo está encendido viajando a menos de 5km/h.
Tiempo en zona verde	h	Tiempo en el cual las RPM permanecen en el rango óptimo (1300-2000 rpm) con una velocidad mayor a 15 km/hora.
Distancia recorrida	km	Distancia total que el vehículo ha recorrido

Fuente: Elaboración propia a partir de lapflotas.com.

#### **4.2.2 Programa de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo**

Es un programa que ha sido desarrollado a fin de mantener y mejorar los índices de confiabilidad y disponibilidad de la flota mediante la estructuración de unos planes de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo basados en las recomendaciones de los fabricantes, la experiencia adquirida y el establecimiento de canales de información por el que se reportan fallas o se monitorean los sistemas electrónicos y mecánicos tales como: reportes de los conductores, alistamientos nocturnos de la flota, inspecciones periódicas de 5000km, monitoreo en tiempo real de variables como códigos de falla, temperatura del motor, presión de

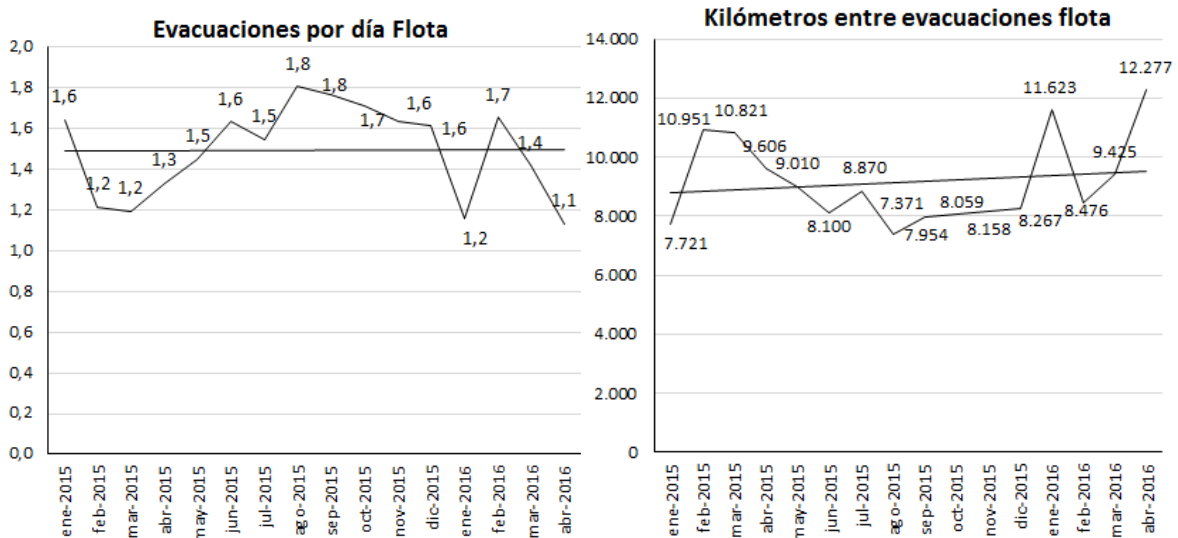
aceite, etc. a través de una plataforma virtual (qsrt.cumandes.com) y análisis de muestras de aceite en la plataforma de Guf (gulfcolumbia.com).

El **mantenimiento correctivo** de un equipo es indeseable ya que requiere de una atención inmediata y tiene altas probabilidades de que las fallas causen daños que representen altos costos e involucre la integridad de los usuarios y del vehículo, por lo tanto debe ser disminuido mediante una buena programación de los mantenimientos preventivos y predictivos. Existen dos niveles para las fallas correctivas, en el primero se incluyen todos aquellos componentes que al fallar no generan una perturbación al servicio comercial del vehículo, y por lo tanto puede ser atendida luego de que el vehículo cumpla el itinerario del día o en un mantenimiento preventivo; en el segundo nivel se encuentran todas aquellas fallas que exigen el transbordo de los usuarios de un bus a otro o desembarque en una estación. Este último nivel es el más crítico debido a que el bus debe ser atendido de inmediato por personal técnico para llevarlo al taller de mantenimiento y allí hacer las reparaciones correspondientes.

Las fallas correctivas que generan transbordos o desembarques de los usuarios (en adelante evacuaciones) conforman el indicador de confiabilidad de la flota. Este indicador se compone de dos partes, la primera es la cantidad de evacuaciones promedio de toda la flota por mes, y la segunda es el kilometraje recorrido entre evacuaciones. Ambos indicadores son consistentes con la definición de confiabilidad dada por Mesa, Grajales et al. (2006) "es la confianza que se tiene de un componente, equipo o sistema para desempeñar su función básica, durante un período de tiempo preestablecido, bajo condiciones estándares de operación", ya que se realizan mantenimientos preventivos y predictivos cada 10000km (o un mes y 20 días aproximadamente) que en teoría deben brindar un nivel de confianza máximo, por ende cualquier falla correctiva va a disminuir esta confianza en los equipos, y mantener los mejores valores de este indicador es el reto diario de los mantenedores.

En la Figura 10 se muestran los resultados de los dos indicadores para la flota de buses entre enero de 2015 hasta abril de 2016. Allí se observa que las evacuaciones por día se han mantenido cercanas a 1,5 con una leve tendencia al aumento en los kilómetros entre evacuaciones, esto indica que los planes de mantenimiento preventivo y correctivo están manteniendo y mejorando la confiabilidad de la flota a pesar de que a mayor el tiempo de operación mayores son los desgastes de los vehículos y por ende mayores requerimientos para

los mantenedores. Para mejorar el entendimiento de estos dos indicadores de flota el primero se determina como la suma de las evacuaciones por día del Articulado y el Padrón (más adelante mostrados), y el segundo como la suma de todos los kilómetros recorridos de Padrón y Articulado entre el total de sus evacuaciones.



**Figura 10:** Indicadores de confiabilidad de la flota.

En la Figura 11 se tiene para la flota de buses Articulados una tendencia creciente en las evacuaciones por día y por ende una disminución en los kilómetros entre evacuaciones, esto puede deberse a que 20 de ellos presentan mayor desgaste en sus componentes electromecánicos por ser los más antiguos (iniciaron operación en el año 2011), además 5 buses fueron agregados a la flota en mayo de 2015 y otros 5 más en marzo de 2016, por lo tanto al ser nuevos presentan fallas muy consecutivas que solo aparecen cuando los buses se someten a la operación comercial, pero a medida que se solucionan van quedando a “punto” y el número de fallas disminuye luego rápidamente.



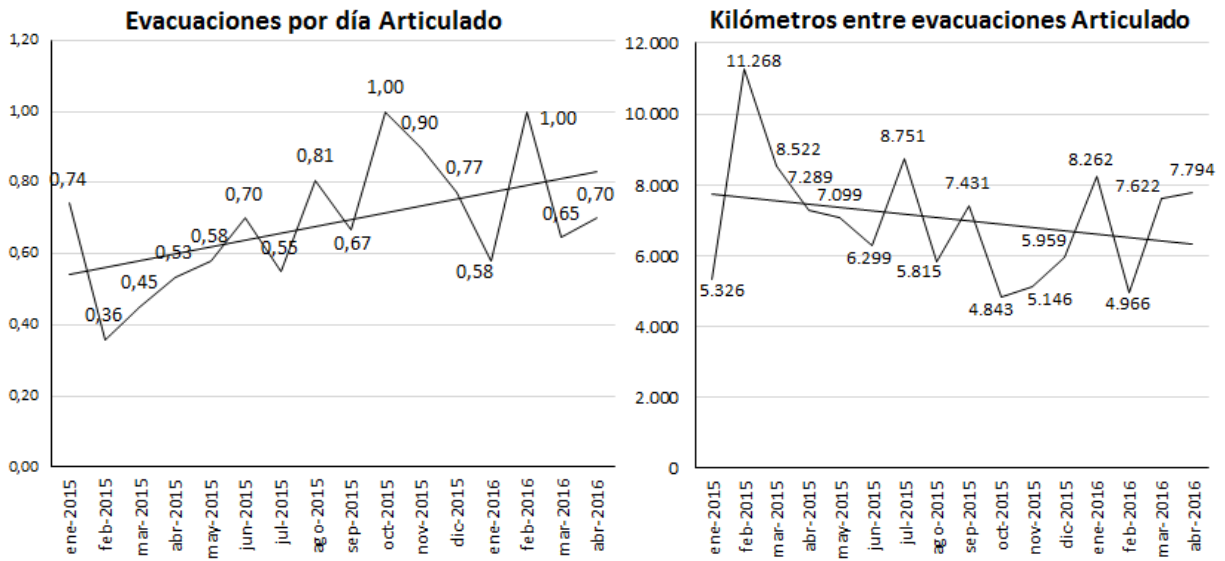


Figura 11: Indicadores de confiabilidad Articulados.

Los buses Padrones por su parte iniciaron operación a mediados del año 2013 y actualmente mantienen una tendencia en la disminución de las evacuaciones por día, esto indica que la flota está incrementando su confiabilidad pasando de 0,9 evacuaciones/día a 0,43 evacuaciones/día, una reducción del 48% de las fallas correctivas.

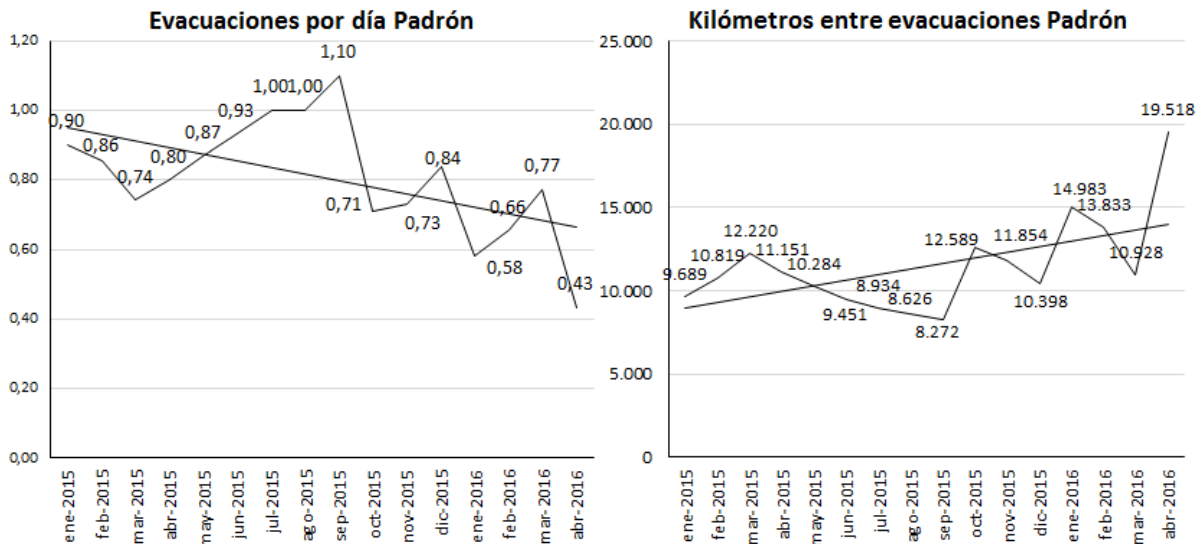


Figura 12: Indicadores de confiabilidad Padrones.

El **mantenimiento preventivo** se estructura con base a las actividades y periodicidades recomendadas por los fabricantes y la experiencia obtenida con los buses mediante el análisis de las fallas que empeoran el panorama de los indicadores de confiabilidad, estos además se ejecutan cada 10000km de recorrido e involucra la atención de todos los sistemas que componen el bus mostrados en la Tabla 4.

**Tabla 4:** Sistemas que componen la flota de buses.

Articulación (Solo Articulados)	Plataforma PMR (Solo Padrones)
Cardan	Puertas
Carrocería	Ruteros
Chasis	Sistema de admisión y escape
Cubos de rueda y frenos	Sistema de combustible
Eje delantero	Sistema de dirección
Eje intermedio (Solo Articulados)	Sistema de refrigeración
Eje trasero y diferencial	Sistema eléctrico
Instrumentos y tablero	Sistema neumático
Llantas	Suspensión
Mando angular (Solo Padrones)	Transmisión de velocidades
Motor	Ventilación y calefacción

La planificación de una rutina de mantenimiento preventivo incluye además de las actividades, tener la disponibilidad de repuestos, personal técnico, herramientas y equipos especiales, disponibilidad de los servicios prestados por terceros, etc., por lo tanto se desarrollan y se ponen a consideración de un grupo de ingenieros y personal de compras con un tiempo previo a su ejecución.

Como complemento a las rutinas de 10000km se han establecido revisiones periódicas cada 5000km y alistamientos nocturnos. La primera busca la identificación de anomalías de manera visual y tangible en los componentes más visibles del bus, allí se revisan por fugas de aceite, refrigerante, ensamblaje de partes, componentes fisurados o faltantes, entre otros, que dependiendo de su importancia para los usuarios y el bus se reparan o se dejan pendientes para la rutina principal de 10000km. Los alistamientos nocturnos se ejecutan diariamente y en ellos se revisan los niveles de algunos fluidos (líquido refrigerante, aceite hidráulico de

dirección, transmisión de velocidades, motor y mando angular), componentes de carrocería y aquellos que son operados por los conductores (calefacción, ventiladores de pasillo, luces, tableros de instrumentos, etc.).

El **mantenimiento predictivo** se desarrolla de acuerdo a dos herramientas fundamentales, la primera es el análisis de muestras de aceite que se toman durante las rutinas de mantenimiento preventivo cada 10000km a los componentes de motor, transmisión de velocidades, mando angular y diferencial. Los resultados de las muestras tomadas llegan a la plataforma de Gulf (gulfcolombia.com) y se analizan semanalmente para establecer actividades en torno a solucionar un problema o hacer las verificaciones respectivas. La segunda herramienta es el análisis de los códigos de falla del motor que se registran en una plataforma virtual (qsrt.cumandes.com) en tiempo real. Estos registros también se analizan semanalmente y se proponen actividades y revisiones en torno a eliminar las advertencias que dan la activación de estos códigos.

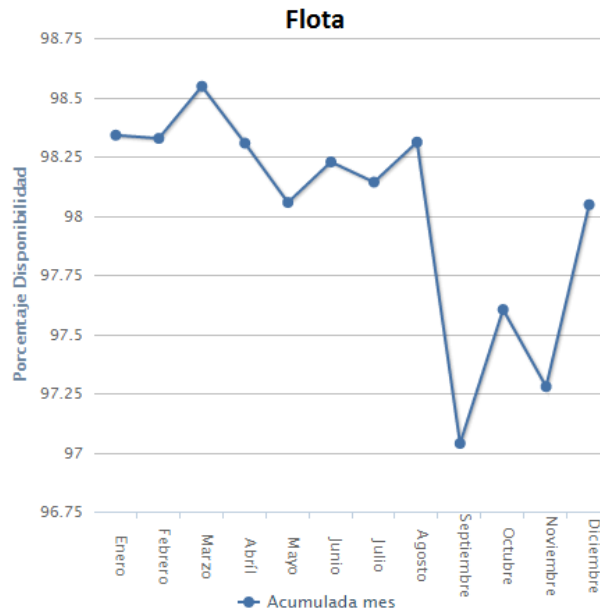
Finalmente, otro indicador utilizado en el programa de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo es el indicador de disponibilidad, este se determina como la relación entre el tiempo real que los buses se encuentran disponibles para ser usados en servicio comercial teniendo en cuenta los tres mantenimientos (correctivo, preventivo y predictivo) respecto al tiempo ideal que los buses tendrían disponible (que se asume 24 horas por bus). La siguiente ecuación muestra con mayor claridad cómo se cuantifica.

$$\text{Disp} = \frac{\sum \text{Tiempo ideal disponible para la operación} - \sum \text{Tiempos en mantenimiento}}{\sum \text{Tiempo ideal disponible para la operación}} * 100 [\%] \quad \text{Ecn. 6}$$

El indicador se alimenta gracias a los reportes realizados por el personal técnico cuando atienden actividades correctivas, preventivas y predictivas, las cuales se registran en una plataforma virtual donde se relaciona la actividad con el tiempo invertido y de esta manera se mantiene disponible para su consulta.

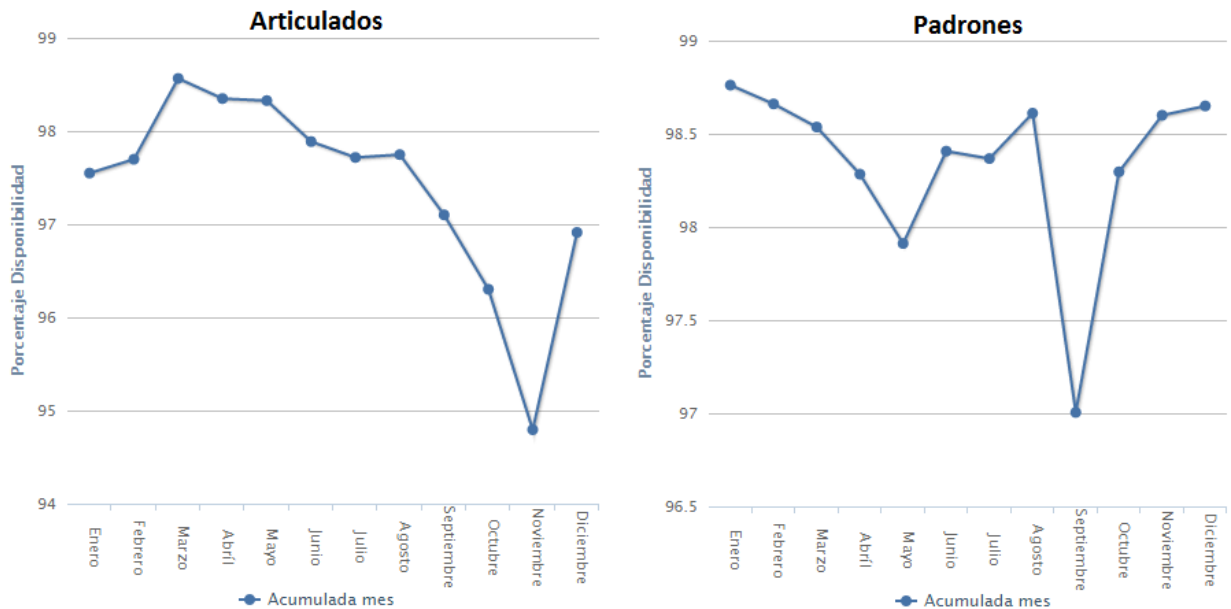
En la Figura 13 se muestran los valores mensuales durante el año 2015 de la disponibilidad de la flota, se observa que esta se mantuvo en más del 97% de su tiempo lista para la operación comercial, lo cual es bastante alto e indica que los mantenimientos se hacen de manera rápida

gracias a los diversos equipos de monitoreo que se tienen disponibles para visualizar fallas del motor, transmisión de velocidades sistemas de frenos, entre otros, además de la experiencia y el conocimiento especializado del equipo técnico.



**Figura 13:** Indicadores de disponibilidad de la flota 2015.

Para la flota de buses Padrones se observa en la Figura 14 una disponibilidad durante el 2015 mayor que el 97%, mientras que en los buses Articulados hay una leve disminución que alcanza el 94% y se asocia principalmente a que 20 de ellos son los más antiguos y hay componentes que van cumpliendo su vida útil, además de otros 5 buses nuevos que apenas estaban iniciando operación comercial y presentaban fallas asociadas a la puesta a punto (como se explicó al inicio de esta sesión), por lo tanto estos últimos requirieron mayor intervención por parte de mantenimiento.



**Figura 14:** Indicadores de disponibilidad de los buses Articulados y Padrones 2015.

### 4.2.3 Programación de la operación

La programación de la operación se realiza directamente por la empresa Metro de Medellín y depende básicamente de la demanda del sistema, la cual se determina mediante los registros obtenidos en los torniquetes cuando los usuarios que entran y salen de las estaciones. Actualmente se han establecido dos horarios que son llamados hora pico y hora valle, el primero es en la mañana de 6:30am a 8:30am y en la tarde de 5:00pm a 8:00pm, mientras que el segundo va en la mañana desde las 4:00am a 6:30am y en la tarde desde las 8:pm hasta las 11:00pm, de lunes a viernes.

Para agosto de 2016 Metro de Medellín ha asignado en las horas pico 27 Articulados y 5 Padrones para operar en la línea L1, 33 Padrones por línea L2, una reserva en mantenimiento o estacionados de 3 Articulados y 5 Padrones que corresponde al 10% de los buses de cada tipo, y 4 Padrones para bucles que cubren los 2 tramos más demandados de las rutas, uno que va entre la estación Aranjuez – Hospital, y el otro entre la estación Industriales – UdeM. En la Tabla 5 se resume la distribución de los buses en hora pico.

**Tabla 5:** Distribución de los buses en las líneas L1 y L2 durante hora pico.

Ruta	Buses	Tipo
L1	27	Articulados
	5	Padrones
L2	33	Padrones
Bucles	4	Padrones
Reserva	3	Articulados
	5	Padrones

Teniendo en cuenta esta distribución de buses, sus capacidades y los tiempos necesarios para realizar una vuelta por L1 y L2 (88 min y 125 min respectivamente), se determina que el sistema en hora pico genera una oferta en línea L1 de 3387 pasajeros/hr, una frecuencia de paso por las estaciones de 2,4 min y una velocidad promedio de 17km/h, mientras que para la línea L2 la oferta es de 1426 pasajeros/hr, frecuencia de paso por las estaciones de 3,8 min y velocidad promedio de 13km/h. En la Tabla 6 se resume la oferta del servicio de transporte actual.

**Tabla 6:** Oferta actual del servicio de transporte.

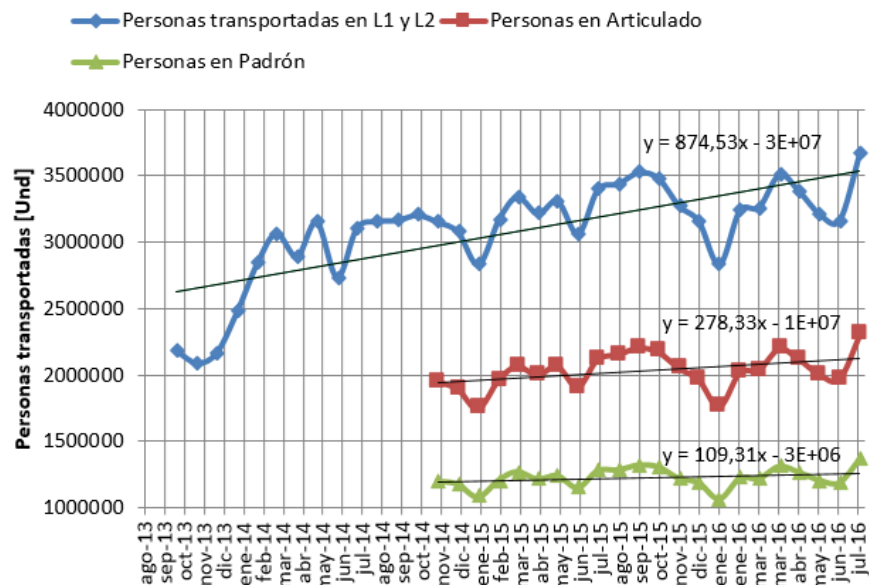
Ruta	Buses	Frecuencia [min]	Oferta [pas/hora]	Tiempo del recorrido [min]	Velocidad [km/h]
L1	36	2,4	3387	88	17,0
L2	33	3,8	1426	125	13,0

En términos generales, el sistema de buses BRT del Metro de Medellín cuenta con importantes avances en su sistema de gestión de flotas, pero la eficiencia en combustible no es tratada con la importancia que se requiere principalmente por las ventajas medioambientales obtenidas por los motores dedicados a GNV y el bajo costo de este combustible respecto a otros como el diésel, con los que se esperan compensar los elevados costos asociados a los vehículos y mejorar la calidad de vida de la ciudad. Sin embargo, la implementación de estrategias que logren disminuir los consumos de combustible tendría impactos beneficiosos principalmente económicos y en la autonomía de los vehículos para su operación comercial.

### 4.3 Demanda del servicio

Como se ha indicado en la tabla de la Figura 4, el sistema BRT de Medellín posee un Índice de Pasajeros por Kilómetro de 9,6, que comparado con los otros sistemas BRT implementados en el país es de los más altos; esto indica que hay una importante densidad de usuarios en el sistema que ha venido creciendo tal como se muestra en la Figura 15, donde se observa que la cantidad de usuarios transportados mensualmente en las líneas L1 y L2 paso de 2'174.094 usuarios a 3'670.444 usuarios aproximadamente entre octubre del 2013 y agosto del 2016.

**Nota:** El número de usuarios transportados de manera discriminada en Articulado y Padrón entre octubre del 2013 y octubre del 2014 no fue posible ser adquirido de la empresa Metro de Medellín; por lo tanto, en las posteriores sesiones donde se incluye el número de personas transportadas por tipo de bus hay que tener en cuenta que estas se desarrollan con base en información que va desde noviembre del 2014 hasta agosto del 2016.



**Figura 15:** Personas transportadas mensualmente por el sistema.

Por su parte, la cantidad de usuarios movilizados por línea L1 ha representado el 87,5% del total de usuarios, mientras que en la línea L2 el 12,5% restante tal como se muestra en los datos de la Tabla 7, cuyos datos fueron tomados entre los meses de noviembre del 2014 y

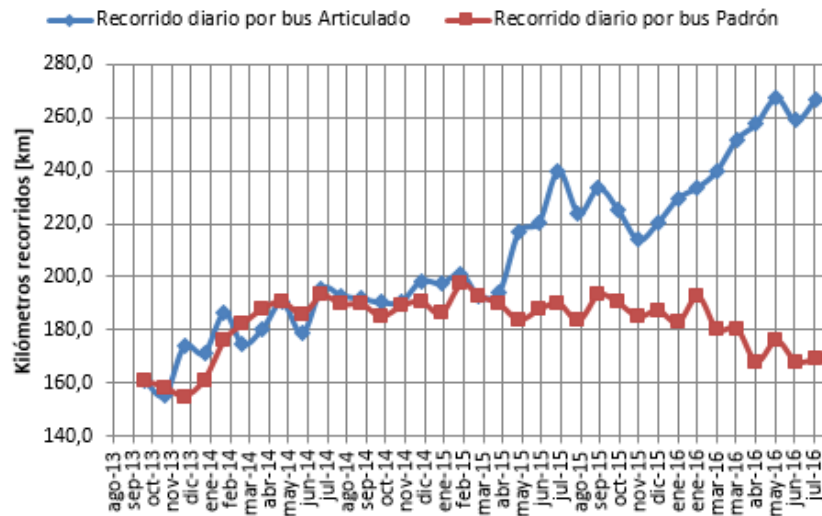
octubre del 2016. Cabe resaltar que las proporciones se han conservado con la tasa de crecimiento mensual de usuarios.

**Tabla 7:** Personas movilizadas por línea.

Mes	Pasajeros movilizados L1	Porción L1 [%]	Pasajeros movilizados L2	Porción L2 [%]
nov-14	2.745.678	87,2	402.523	12,8
dic-14	2.672.876	86,9	401.593	13,1
ene-15	2.462.322	87,1	365.768	12,9
feb-15	2.763.614	87,3	403.759	12,7
mar-15	2.913.868	87,3	424.996	12,7
abr-15	2.816.960	87,7	396.430	12,3
may-15	2.911.721	88,0	395.599	12,0
jun-15	2.691.828	88,0	368.586	12,0
jul-15	2.984.807	87,9	411.081	12,1
ago-15	3.035.868	88,3	402.624	11,7
sep-15	3.105.432	88,1	418.173	11,9
oct-15	3.061.618	88,0	416.859	12,0
nov-15	2.890.156	88,4	380.869	11,6
dic-15	2.770.190	87,8	383.660	12,2
ene-16	2.483.083	87,8	345.058	12,2
feb-16	2.843.716	87,8	395.884	12,2
mar-16	2.874.426	88,2	385.154	11,8
abr-16	3.096.296	88,3	411.271	11,7
may-16	2.982.241	88,2	398.754	11,8
jun-16	2.822.784	88,0	386.151	12,0
jul-16	2.774.889	87,9	383.724	12,1
ago-16	3.244.376	88,4	426.068	11,6

La tendencia creciente por la demanda del servicio prestado por estos buses se relaciona, entre otros factores, al desarrollo económico de la ciudad, restricciones en la movilidad de las vías mixtas y el crecimiento de la población, y como consecuencia se ha requerido aumentar el número de kilómetros recorridos diariamente de la manera como se muestra en la Figura 16, además del número de buses especialmente de Articulados que se han incluido parcialmente a la operación, 5 en mayo del 2015 y 5 más en marzo del 2016, así pues se mantiene controlado el IPK planeado para la flota sin ir en contra de la calidad establecida para el servicio.





**Figura 16:** Promedio de kilómetros recorridos diariamente Articulado y Padrón.

## Propuesta del sistema de gestión de la energía (SGE)

La norma ISO 50001 es similar en su estructura a otras normas como la ISO 90001 y por lo tanto su planteamiento se basa en el cumplimiento de objetivos energéticos que son trazados por la dirección a través de un grupo que este designa para llevar a cabo la ejecución de su sistema de gestión. Este proceso está formado por el ciclo P-H-V-A y comprende las siguientes fases.

- **Fase de planificación energética:** se establecen los objetivos energéticos, los cuales parten de una línea base que se realiza gracias a la caracterización de la energía del objeto en estudio (sea empresa o equipos), y se logran mediante la estructuración de un plan de acción. Los objetivos deben ser monitoreados mediante unos IDEn y además ser congruentes con las políticas de la empresa.
- **Fase de implementación y operación:** se ejecutan las estrategias y procesos orientados a cumplir los objetivos, estos deben ser coherentes con la operación de los equipos y empresa.
- **Fase de verificación:** se implementan controles que permitan realizar un seguimiento al SGE de tal manera que permita visualizar su estado actual, el comportamiento en el tiempo y el nivel de cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente.
- **Revisión de la alta dirección:** de acuerdo a los resultados obtenidos durante la fase de verificación se identifican las no conformidades existentes y posteriormente se toman

acciones para eliminarlas. Finalmente, cuando se corrige una no conformidad, debe someterse a una nueva verificación para demostrar su conformidad con los requisitos.

Teniendo en cuenta que el actual proyecto busca proponer un SGE para el sistema de buses BRT del Metro de Medellín, entonces el enfoque principal se ha realizado sobre la fase de planificación, debido a que las siguientes fases requieren de su implementación y obtención de resultados iniciales para asegurar un adecuado ciclo P-H-V-A, sin embargo se plantean hasta un punto tal que sirven como punto de partida para el grupo encargado del SGE.

## 5.1 Planificación energética

Ésta consiste en reunir la información de consumo de energía y analizarla, con el fin de identificar los usos significativos de la energía y las variables que lo afectan. Del resultado de la planificación energética, se definen los controles operacionales y las actividades de monitoreo, medición y análisis de la organización (De Laire, 2013).

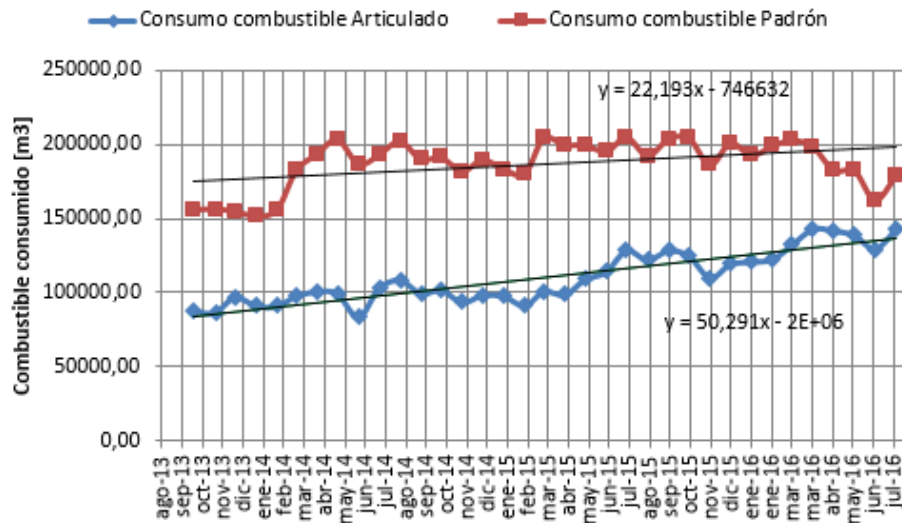
### 5.1.1 Revisión energética

La caracterización de la energía enfocada sobre el consumo de combustible de los buses se realiza con el propósito de diagnosticar cómo se está utilizando este recurso y la manera como es influenciado por las diferentes variables (condiciones de operación, la tecnología usada, tipo de combustibles, etc.).

Para hacer esta caracterización en primer lugar se han diferenciado los buses por su tipo entre Padrones y Articulados (este último incluye dos modelos que son el Articulados BLK y el ZT), y para cada uno se han analizado 3 elementos que son: el consumo mensual de combustible, el rendimiento y la autonomía.

**Consumo de combustible:** Los datos del consumo de combustible mensual de la flota son tomados de los registros dados por EPM (proveedor del GNV) al Metro de Medellín, y facilitados para este proyecto por este último. En la Figura 17 se observa que los buses Articulados en octubre de 2013 consumieron 88.059,70m<sup>3</sup> y mensualmente fue incrementado hasta llegar a 142.456,86m<sup>3</sup> en el mes de agosto del 2016, los buses Padrones por su parte

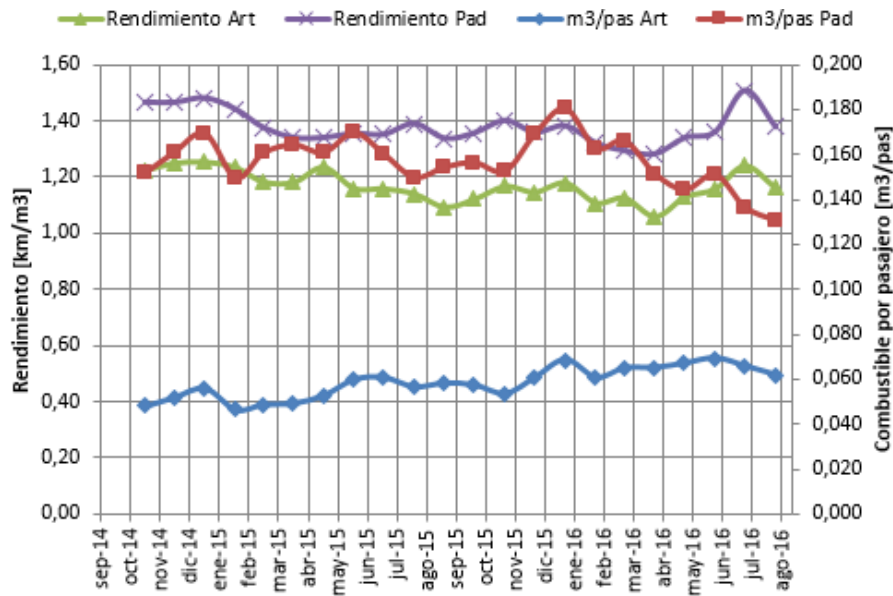
presentaron un comportamiento similar aunque con una menor pendiente o tasa de crecimiento pasando de 155.698,23m<sup>3</sup> a 178.525,20m<sup>3</sup> en ese mismo periodo de tiempo. En términos generales, la flota incrementó en ese intervalo de tiempo su consumo de combustible en un 32%.



**Figura 17:** Consumo de combustible mensual de la flota por tipo de bus.

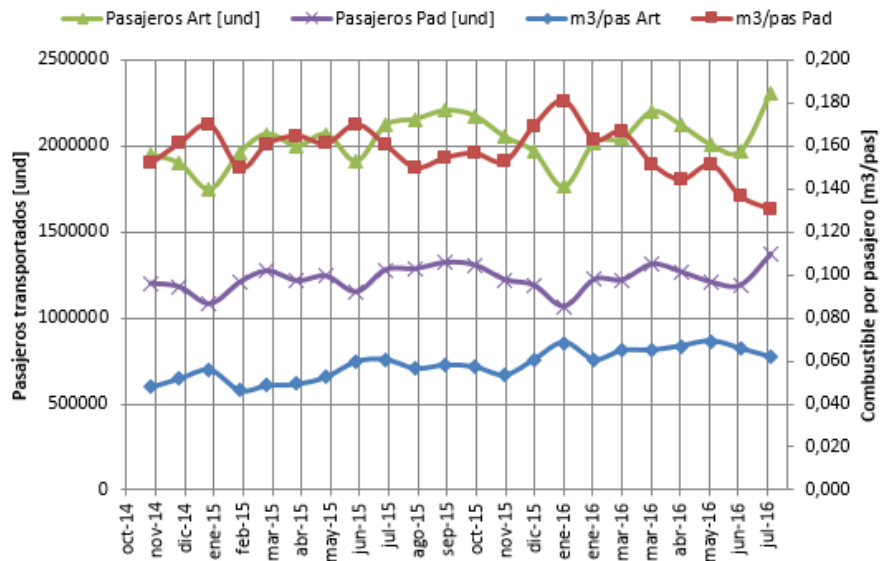
El consumo de combustible es una variable que depende en gran parte de la demanda del servicio y los kilómetros recorridos, por lo tanto su variabilidad está ligada al comportamiento de estas en el tiempo. En la Figura 15 se observa que la demanda en el servicio de la flota tuvo un incremento del 69% entre octubre del 2013 y agosto del 2016, mientras que los kilómetros recorridos incrementaron un 23% en ese mismo periodo de tiempo (ver Figura 16).

**Rendimiento:** El rendimiento de estos vehículos puede analizarse desde dos puntos de vista, el primero en términos de los kilómetros que se pueden recorrer con un metro cúbico de combustible GNV (en adelante llamado solo rendimiento) y el segundo en los metros cúbicos de combustible GNV que se le asigna a cada pasajero. En la Figura 18 se han graficado para los buses Articulados y Padrones.



**Figura 18:** Comparación Rendimiento Vs Combustible por pasajero.

Se observa evidentemente que el rendimiento y el combustible por pasajero tienen comportamientos inversos puesto que una mayor cantidad de usuarios transportados exige más potencia a los motores y por ende mayor consumo de combustible, sin embargo el incremento en el consumo debido a esta razón realmente no afecta negativamente el rendimiento, en la Figura 19 se muestra que menor es el combustible asignado a cada pasajero cuando un mayor número es transportado y por lo tanto mayor será la optimización del combustible en términos de la prestación del servicio. Vujanovic et al. (2010) también evidenció este comportamiento en su investigación con otros tipos de vehículos y de carga.



**Figura 19:** Comparación Combustible por pasajero Vs Pasajeros transportados.

También el rendimiento puede ser afectado por las condiciones de las rutas, tal como pasa con los buses Padrones cuando circulan por línea L2 y su tramo mixto entre las estaciones de Industriales y Hospital, puesto que allí hay semáforos, alto tráfico, obras para restauración de las vías, alto flujo peatonal, entre otras, ocasionando constantemente detenciones y arranques de los vehículos que demandan mayor potencia del motor para vencer su inercia, y entonces un mayor consumo que se ve reflejado en menos rendimiento.

Así pues, la combinación entre la demanda del servicio y las condiciones de las rutas, en especial de la línea L2, describen gran parte de la variabilidad del rendimiento en los vehículos (en términos de km/m<sup>3</sup> y m<sup>3</sup>/pas), sin embargo existen otros factores como el tipo de conducción y el funcionamiento de sus sistemas electromecánicos que, en menor medida y dependiendo de ciertas condiciones podrían también afectarlo, y es en este punto el enfoque de la presente investigación desde un marco de la gestión de la energía que se mostrará más adelante.

**Autonomía:** La autonomía de los buses se refiere a la cantidad total de kilómetros que pueden recorrer con el máximo volumen de combustible almacenado. Para identificar su comportamiento histórico es necesario determinar el producto entre los valores de rendimiento mensual y el volumen de gas máximo que pueden almacenar los tanques a 1 atmósfera, este

último depende fuertemente de la temperatura y por lo tanto tendrá variaciones si se realiza el repostaje en el día o en la noche.

El comportamiento del rendimiento mensual por tipo de bus entre los meses de octubre del 2013 y agosto del 2016 se muestra en la Figura 18, mientras que el volumen máximo de gas almacenado a 1 atmósfera debe ser calculado mediante la siguiente expresión obtenida a partir de la ecuación general de gases ideales.

$$V_{T,patm} = \frac{P_T * V_T * T_{amb}}{T_{d,n} * P_{atm}} [m3] \quad \text{Ecn. 7}$$

El  $V_T$  de los Padrones se obtiene de sumando el volumen de sus 6 tanques de 80L y los 2 de 120L (en total 0,72m3) y en los Articulados sumando el volumen de sus 9 tanques de 120L (en total en total 1,08m3), los cuales se llenan a una presión aproximada de 3.000psi (20Mpa). En la Tabla 8 se muestra un resumen de los valores de cada variable y los resultados para el  $V_{T,patm}$ .

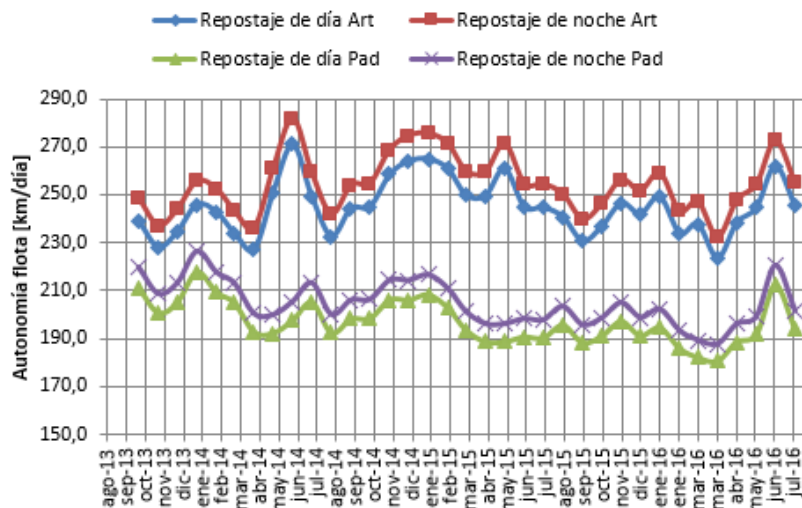
**Tabla 8:** Determinación de los volúmenes de gas almacenados en los tanques por bus.

Temperatura promedio, $T_{amb}$ [°C]*	21,6		
Presión atm promedio, $P_{atm}$ [kPa]*	85,1		
Temperatura amb. Noche, $T_{d,n}$ [°C]*	16,5		
Temperatura amb. Día, $T_{d,n}$ [°C]*	28		
<b>PADRÓN</b>		<b>ARTICULADO</b>	
Volumen tanques, $V_T$ [m3]	0,72	Volumen tanques, $V_T$ [m3]	1,08
Presión max. en tanques, $P_T$ [kPa]	20000	Presión max. en tanques, $P_T$ [kPa]	20000
Reserva [kPa]**	3000	Reserva [kPa]**	3000
<b>Repostaje de noche</b>		<b>Repostaje de noche</b>	
Volumen a 1atm, $V_{T,patm}$ [m3]	146,34	Volumen a 1atm, $V_{T,patm}$ [m3]	219,51
<b>Repostaje de día</b>		<b>Repostaje de día</b>	
Volumen a 1atm, $V_{T,patm}$ [m3]	140,75	Volumen a 1atm, $V_{T,patm}$ [m3]	211,13

\*Condiciones ambientales promedio de la ciudad de Medellín tomados de: [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/modelclimate/medell%C3%ADn\\_colombia\\_3674962](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/modelclimate/medell%C3%ADn_colombia_3674962).

\*\* La reserva es el valor mínimo que se deja en los tanques para que un bus pueda llegar a la estación de servicio y no se suma a la autonomía.

En la Figura 20 se ha graficado la autonomía histórica para cada tipo de bus dependiendo de la temperatura promedio durante el repostaje, en este caso la del día y de la noche, y se encuentra que existe una diferencia cercana al 4,0%, siendo el repostaje de la noche el que mayor autonomía provee a los buses.



**Figura 20:** Autonomía por tipo de bus.

Al comparar las gráficas de la Figura 20 con las gráficas de los kilómetros recorridos diariamente que se muestran en la Figura 16, se observa en los Padrones que en teoría la cantidad máxima de combustible almacenado por los tanques debería alcanzar para que los buses recorran el promedio diario de kilómetros previsto, sin embargo el personal encargado de la operación evita correr riesgos al dejar un vehículo con insuficiente combustible para el servicio comercial al finalizar el día y por lo tanto ambos tipos de buses son enviados a repostar 2 veces, la primera a medio día y la segunda después de las 11pm.



### 5.1.2 Línea base

Un sistema de información de Monitoreo de Energía y Establecimiento de Metas (M&T, por sus siglas en inglés) es una técnica de eficiencia energética basada en el estándar de gestión que indica "no se puede gestionar lo que no se puede medir", el cual retroalimenta a los gestores de la energía sobre las prácticas operativas, resultados de los proyectos de gestión energética y orientación en el nivel de consumo de energía que se proyecta para cierto período, y de esta manera permitirles plantear metas y objetivos cumplibles para reducir los costos energéticos a través de una mejora en la eficiencia energética y en el control de la gestión energética. Otros beneficios generalmente incluyen mejoras en la eficiencia de los recursos, mejora en los presupuestos de producción y reducción de emisiones de GEI.

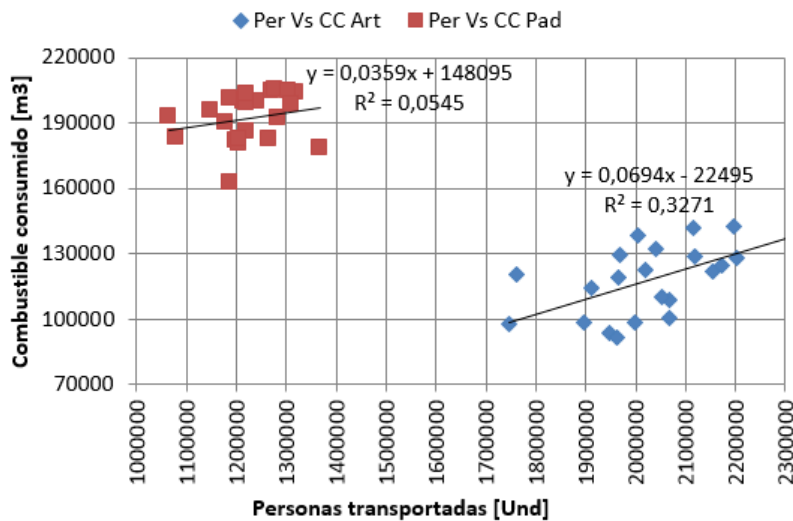
Teniendo en cuenta que en la mayoría de los procesos desarrollados por las empresas la física subyacente de cada uno de ellos determina en gran medida la relación entre el consumo de energía y la producción, se puede aplicar la técnica M&T con valores de producción contra el consumo de energía asociados en un gráfico dispersión que puede representarse con una ecuación de regresión que generalmente es lineal y tiene la siguiente forma (Figueroa, 2008):

$$E = mP + E_{nap} \quad \text{Ecn. 8}$$

Donde, E es energía de producción, m la pendiente de Producción, P la producción y  $E_{nap}$  la carga base de energía para el sistema.

Siempre y cuando la relación entre las variables analizadas sea adecuada puede considerarse esta ecuación como la línea de base energética.

Para el caso de la flota de buses BRT de Medellín se ha tomado la variable de producción como los pasajeros transportados mensualmente por ser el servicio que se presta, y la variable consumo de energía como el combustible consumido durante el mes. El comportamiento que tengan estas variables va a ser diferente en los Articulados y los Padrones ya que difieren del rendimiento, operación y la demanda del servicio, por lo tanto se proponen dos líneas de base energética para el SGE. En la Figura 21 se han graficado dichas variables con sus respectivas regresiones lineales para cada tipo de bus.



**Figura 21:** Producción (Personas transportadas) Vs Consumo de energía (Combustible consumido).

El intercepto positivo en la ecuación de regresión lineal del Articulado indica que aunque no hay personas transportadas existe una carga base del sistema, y se da cuando se tienen consumos de combustible sin prestar servicio comercial, por ejemplo un vehículo que se encuentra encendido por pruebas de ruta en vacío solicitadas por el área de mantenimiento, viajes hacia las estaciones de combustible o talleres, tramos en los recorridos durante hora valle donde no hay usuarios, encendido del motor para la realización de los alistamientos diarios, entre otros.

La pendiente por su parte es la relación entre la producción y el consumo de energía que equivale a la eficiencia del proceso, en este caso corresponde al combustible asignado a cada pasajero que se transporta y va a depender de factores como el tipo de conducción, parte de la logística de la operación y la eficiencia de los sistemas eléctricos y mecánicos que tienen los buses.

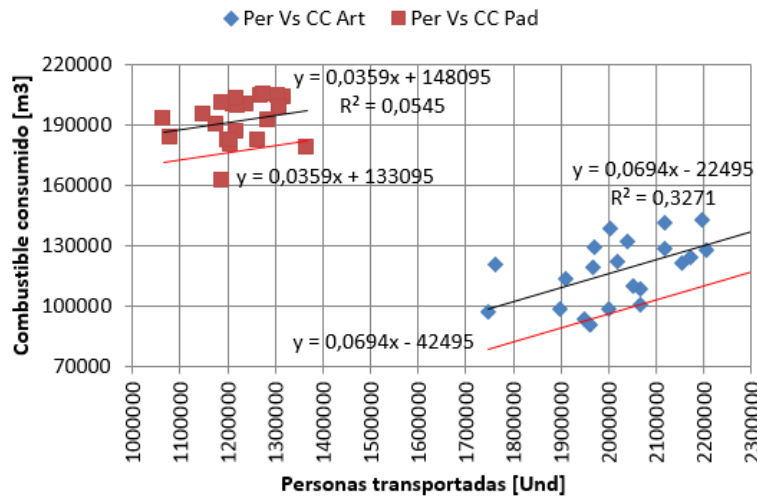
La correlación ( $R^2$ ) se refiere al grado de variabilidad que hay en el desempeño energético y depende de factores operacionales. En este caso se obtuvo para los dos tipos de buses bajas correlaciones que demuestran la inexistencia de un proceso de control sobre el comportamiento del combustible en función del servicio prestado que incluye: el tipo de conducción y el direccionamiento dado a las capacitaciones que se dictan actualmente a los operadores, los mantenimientos y tratamientos dados a los vehículos en función de su

disponibilidad y confiabilidad mas no sobre el funcionamiento de ciertos sistemas electromecánicos enfocados a la disminución del consumo energético, como es el caso de la transmisión de velocidades y el motor que son electrónicos y configurables, además de la logística utilizada para prestar el servicio comercial que no tiene en cuenta por ejemplo el tipo de vehículos y las diferentes horas del día para optimizar su uso y el combustible.

### **5.1.3 Objetivos energéticos**

Los potenciales de ahorro por variabilidad operacional significan, en la gráfica Producción Vs Consumo de energía, ahorros que se pueden lograr analizando y estabilizando la operación, puesto que para una misma producción se observan diferentes consumos energéticos. La idea es estandarizar los valores de operación de las variables con los días de máxima eficiencia para diferentes intervalos de trabajo y tratar de estabilizar el proceso en estos puntos a través de buenas prácticas energéticas o acciones de ahorro de energía (Del Pilar, González, & Quispe, 2013).

Para el cálculo de los potenciales de ahorro en combustible por variabilidad operacional se requiere establecer una “línea meta” que pasa por el centro de los datos relacionados al menor consumo, correspondiente a las prácticas operacionales de mayor eficiencia en el proceso, teniendo en cuenta que la pendiente ( $m$ ) de las líneas tomadas como base energética va a ser conservada si no se realizan cambios en aquellos factores que le afectan. En la Figura 22 se han graficado las líneas meta estimadas (en rojo) de combustible para las dos líneas base de cada tipo de bus.



**Figura 22:** Línea meta de combustible estimada (roja) en un gráfico de dispersión de consumo de combustible frente a personas transportadas.

El potencial de ahorro en combustible por reducción de la variabilidad operacional puede cuantificarse a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Potencial de ahorro} = E_{nap(\text{base})} - E_{nap(\text{meta})} \text{ [m3]} \quad \text{Ecn. 9}$$

Así pues, el combustible GNV aproximado que se espera sea reducido por variaciones en la operación es aproximadamente de 15000m3 en Padrón y 20000m3 en Articulado, los cuales representan un ahorro en costos cercano a los \$45'429.300 COP mensualmente (valor calculado usando un valor por m3 del GNV para Medellín de COP \$1297,98 el día 25/9/2016).

#### 5.1.4 Indicadores de desempeño energético

La introducción de un sistema de indicadores para la medición del desempeño energético de la flota de buses es importante porque permiten analizar los resultados positivos o negativos de las acciones que se han planteado para cumplir los objetivos del SGE. Del Pilar et al., 2013 han propuesto 3 tipos de indicadores que son: Indicador de Consumo de energía IC, Indicador de Eficiencia Base 100 e Indicador Gráfico de Tendencia o de Sumas Acumulativas CUSUM, sin embargo, como el SGE no ha sido implementado entonces la determinación de los IDEn en el tiempo se ha dividido en dos partes, la primera a partir de los datos reales tomados de la flota desde noviembre del 2014 hasta agosto del 2016, y la segunda corresponde a una proyección

desde enero del 2017 hasta julio del mismo año si fuese implementado a finales del 2016, que se realiza gracias a las ecuaciones de tendencia obtenidas para el combustible consumido y las personas transportadas (Figura 17 y Figura 15 respectivamente).

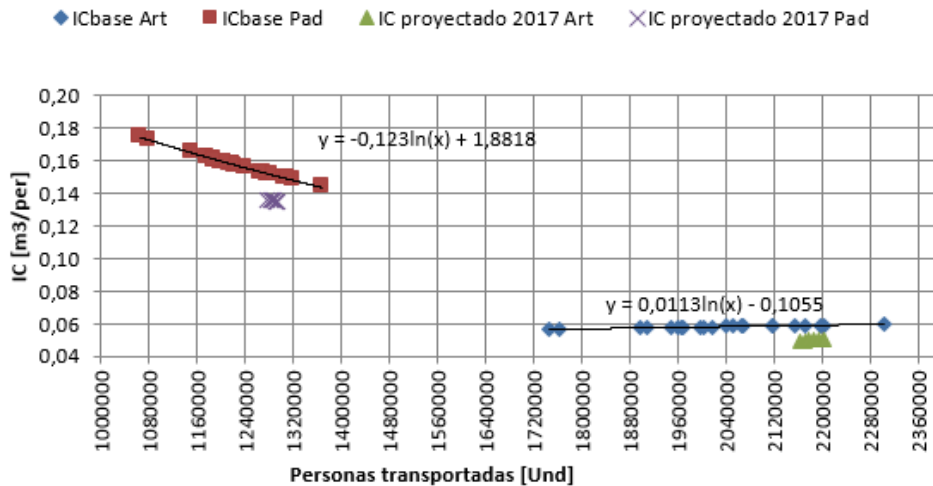
**Indicador de consumo de energía IC:** Se define como la relación entre la energía consumida y el valor de la producción obtenida con dicha energía, para el caso de los buses se expresa de la siguiente manera.

$$IC = \frac{\text{Consumo de energía}}{\text{Producción}} = \frac{\text{Combustible consumido x mes}}{\text{Personas transportadas x mes}} \quad \text{Ecn. 10}$$

Vista a partir del cálculo de la línea de base (Ecuación 8), se obtiene el Indicador de Consumo base como:

$$IC = m + \frac{E_{nap}}{P} \left[ \frac{m^3}{und} \right] \quad \text{Ecn. 11}$$

La Ecuación 11 representa el Indicador de Consumo conformada por la pendiente (m) de la Ecuación 8 y otro factor que es función de la variable producción o personas transportadas (P). En la Figura 23 se ha graficado esta función para los dos tipos de vehículos.



**Figura 23:** Variación del Indicador de consumo (IC) respecto a las personas transportadas por mes.

La tendencia negativa de la regresión logarítmica obtenida para el bus Padrón señala que a mayor número de personas transportadas es menor la cantidad de gas que se requiere para movilizarlas, mientras que en el bus Articulado el comportamiento es muy horizontal e incluso levemente contrario puesto que son estos los que transportan la mayor cantidad de usuarios del sistema. Con la implementación del SGE se esperaría para el primer semestre del 2017 que los dos tipos de buses tengan un IC bajo con valores cercanos a 0,136m<sup>3</sup>/pas en Padrón y 0,049m<sup>3</sup>/pas en Articulado teniendo en cuenta los objetivos de ahorro en el combustible.

**Indicador de eficiencia base 100:** Es una herramienta que compara el comportamiento de los resultados de consumo energético medidos en un proceso durante un periodo operativo respecto a los valores de consumo energético base o de tendencia, tomando como referencia de cumplimiento un valor adimensional de 100. Matemáticamente se define de acuerdo a la Ecuación 12.

$$Eficiencia\ base\ 100 = \frac{E_{Tendencia}}{E_{medida}} \times 100 \quad Ecn. 12$$

La variable  $E_{Tendencia}$  se cuantifica con la Ecuación 8 y es el consumo de combustible que en promedio se debieron consumir los vehículos en cada mes, mientras que la variable  $E_{medida}$  corresponde al consumo de combustible real de ese mismo periodo. En la Figura 24 se ha graficado este indicador para el bus Articulado y Padrón con las proyecciones para el 2017.

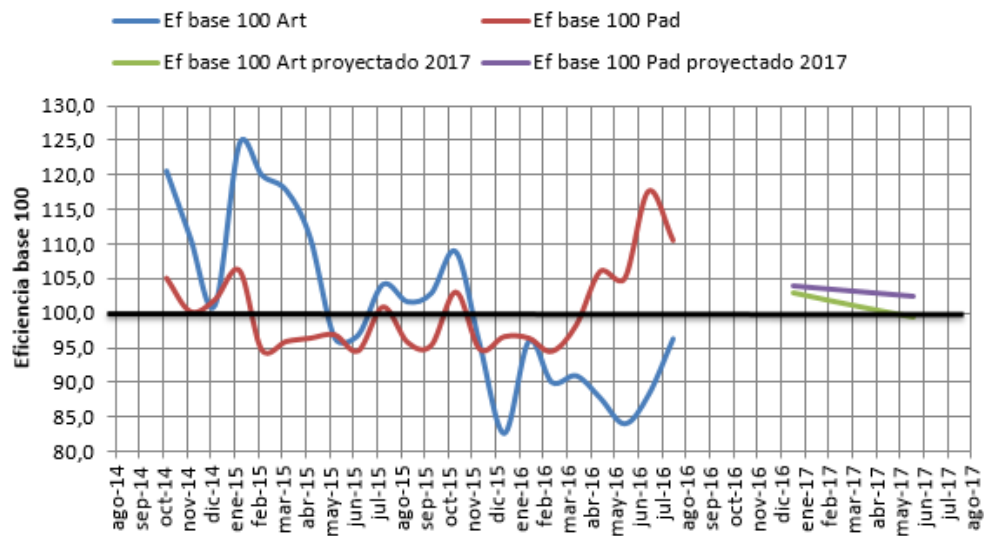


Figura 24: Indicador de eficiencia base 100.

El indicador de Eficiencia Base 100 se puede entender de acuerdo a tres estados, el primero cuando es mayor a 100% significa que el consumo de energía del periodo analizado fue menor que el que debería ser según la tendencia estimada a partir de la Ecuación 8 y por lo tanto se ubica en la zona de eficiencia, el segundo cuando el indicador es menor a 100% ocurre que en el periodo analizado se consumió mayor energía a la que se debía consumir según la tendencia y por lo tanto se ubica en la zona de ineficiencia, finalmente cuando el indicador es igual a 100% simplemente el consumo es estable y se haya dentro del consumo por tendencia.

Ahora bien, para los dos tipos de buses el indicador de eficiencia base 100 ha resultado ser en algunos meses menor al 100% y en otros mayor, esto significa que el consumo de combustible no es controlado adecuadamente por los administradores de la flota y por lo tanto se comporta algunas veces de manera ineficiente. Las proyecciones al 2017 muestran que es posible llevar y mantener el indicador por encima del 100% con la implementación del SGE, sin embargo, en vista del crecimiento en el consumo de combustible asociado al incremento en la demanda de usuarios, es necesario replantear los objetivos de ahorro cada 6 meses, justo cuando el indicador de eficiencia base 100 vuelve a tomar valores de 100%.

La importancia de este indicador es que genera alertas en cuanto a variaciones positivas o negativas de la eficiencia del proceso, facilitando el análisis y generación de planes de acción en función de las mejores prácticas energéticas, los cuales permiten interacciones analíticas entre las personas transportadas y el consumo de combustible con miras a un mejoramiento continuo.

**Indicador Gráfico de Tendencia o de Sumas Acumulado CUSUM:** Es utilizado para monitorear la tendencia de la empresa, área o equipo en cuanto a la variación de sus consumos energéticos con respecto a un período dado, ya que permite visualizar y determinar la magnitud de la energía que se ha dejado de consumir o se ha sobre consumido hasta el momento de su actualización.

Este indicador se determina llevando la media de los valores de consumos energéticos a cero para visualizar sus fluctuaciones aleatorias entre valores positivos y negativos en el tiempo, la Ecuación 13 permite realizar dicho tratamiento.

$$S_i = X_i - \bar{X} \quad \text{Ecn. 13}$$

Donde,  $S_i$  son los valores de consumos energético con media cero,  $X_i$  el consumo de combustible del mes  $i$  y  $\bar{X}$  el consumo de combustible mensual promedio.

Tendencias de  $S_i$  crecientes representan momentos de ineficiencia energética en los procesos, mientras que las tendencias decrecientes momentos de eficiencia energética.

Adicionalmente, se recomienda establecer límites de control (en verde y rojo de la Figura 25) que ayuden a visualizar cambios aceptables o no en los consumos de energía, la Ecuación 14 permite establecer dichos límites teniendo en cuenta que los datos se aproximan a una distribución normal; sin embargo se pueden ajustar de acuerdo al desarrollo del sistema de gestión en el tiempo para que genere alertas más convenientes de acuerdo al comportamiento que este indicador vaya teniendo.

$$S_i \pm 3 * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecn. 14}$$

Donde,  $n$  es el número de datos y  $\sigma$  la desviación estándar de los datos.

La normalidad del consumo de combustible para ambos tipos de buses fue verificada mediante el test de Jarque-Bera en Matlab con la función "jbtest(x)", el cual se formula bajo la hipótesis nula de normalidad de los residuos y se construye de la siguiente manera:

$$JB = n * \left[ \frac{s^2}{6} + \frac{(k - 3)^2}{24} \right] \sim \chi_2^2 \quad \text{Ecn. 15}$$

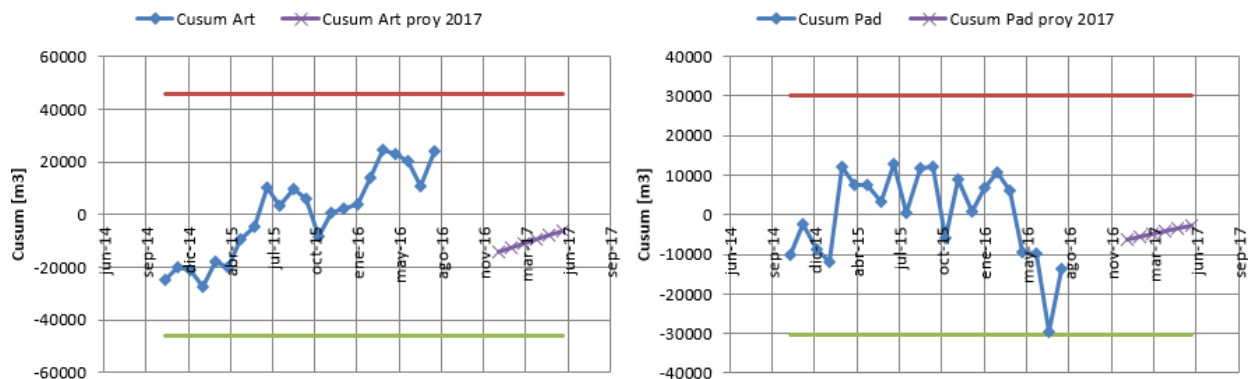
Donde,  $n$  es el tamaño muestral (número de datos),  $s$  el coeficiente de asimetría y  $k$  la curtosis o apuntamiento.

Valores de JB para el estadístico menores al valor crítico tabulado  $\chi_2^2 = 5,99$  utilizando un nivel de significación del 5% señalan que no se puede rechazar la hipótesis nula de normalidad de los residuos, cumpliéndose por tanto este supuesto básico.



Los resultados obtenidos luego de aplicar la prueba en Matlab permiten detectar a un nivel de significancia del 5% que el combustible consumido por el bus Articulado y Padrón presentan una distribución normal, por lo tanto se ha graficado el indicador de tendencias CUSUM para ambos desde noviembre del 2014 hasta agosto del 2016 con las proyecciones para el 2017 luego de la implementación del SGE que se propone (ver Figura 25).

Se evidencia en la figura correspondiente al bus Articulado que entre el mes de noviembre del 2014 y junio del 2015 estos habían operado eficientemente, pero a partir del mes siguiente hasta agosto del 2016 operaron consumiendo mayor combustible (con una excepción en noviembre del 2015), los Padrones por su parte tuvieron un consumo de combustible bajo entre noviembre del 2014 y febrero del 2015, pero en los meses siguientes sobrepasó la media (CUSUM cero) y se mantuvo así hasta abril del 2016 (con la misma excepción en noviembre del 2015), luego desde mayo del 2016 volvieron a consumir menos combustible.



**Figura 25:** Indicador gráfico de tendencia o sumas acumulativas CUSUM (izquierda Articulado, derecha Padrón).

Todos estos cambios en el indicador CUSUM señalan que no existe una adecuada administración de la flota en función de la optimización de su combustible, pero gracias al SGE propuesto es posible mantener las variaciones en el consumo de combustible por debajo de cero de manera controlada puesto que hubo meses en los que se ha logrado. Se espera entonces las tendencias cercanas a las proyectadas en los buses Articulados y Padrones el primer semestre del 2017 que se muestran en la Figura 25.

### **5.1.5 Plan de acción**

Un plan de acción contiene una serie de actividades que ayudan dar cumplimiento a los objetivos establecidos para el SGE, y su formulación requiere identificar en dónde, cómo y cuánta cantidad de combustible se utiliza durante el funcionamiento de los vehículos.

La información que puede responder dichas cuestiones viaja por la línea CAN de cada bus, sin embargo, por la vasta cantidad de variables y datos que se pueden extraer es difícil realizar un correcto análisis sin el uso de métodos estadísticos avanzados. Uno de los propósitos del análisis multivariante de datos es lograr el procesamiento de la información y determinar de todas las variables seleccionadas cuales explican mejor la variabilidad del consumo de combustible, luego con base en el comportamiento de cada una de ellas plantear recomendaciones que permitan definir adecuadamente estas actividades. A continuación se realiza dicho procedimiento para el caso en estudio.

#### **5.1.5.1 Estructuración de las bases de datos**

La formulación de las bases de datos ha requerido la recopilación de información proveniente la línea CAN de los vehículos y de los registros de conducción (en adelante llamadas base de datos tipo “Línea CAN” y “Conducción”, respectivamente), para cada una se han establecido dos bases de datos que pertenecen al bus Articulado BLK y al bus Padrón.

Las bases de datos de Línea CAN se desarrollaron en el Articulado con placa STW003 y Padrón TTM115, y contienen información sobre del funcionamiento de sus principales sistemas (motor, transmisión y frenos); ambos fueron monitoreados a través de una interfaz y software de diagnóstico que se instaló cuando prestaban su servicio comercial desde la estación Plaza Mayor, retorno Aranjuez y finalmente Nutibara (ver Figura 4), durante la hora pico de la tarde que va desde las 5pm hasta las 8pm por la línea L1 (condición de máxima exigencia pero dentro de lo cotidiano para la operación). Cabe anotar que previo a la iniciación de dicho recorrido se verificó que ambos buses se encontraran en buenas condiciones eléctricas y mecánicas para garantizar que las variables medidas estuvieran dentro de los rangos normales de operación y así representar mejor la flota de buses.

De las múltiples variables que se podían monitorear varias fueron descartadas inmediatamente debido a que no tienen relación con el consumo de combustible, algunas de estas son la posición del switch de encendido, el voltaje en las bobinas de ignición, la presión de aceite en el motor, entre otras, en total fueron seleccionadas 14 descritas en la Tabla 9, donde además se encuentra el Rendimiento instantáneo que es definido como la cantidad de kilómetros que recorre el bus con un litro de gas para las condiciones de un instante de tiempo. La frecuencia con que fueron tomados los datos de cada variable fue de 1 segundo.

**Tabla 9:** Variables de la Línea CAN del vehículo.

Abrev.	Variable	Unidad de medida	Descripción de variables
X1	Carga porcentual	%	Porcentaje de la potencia entregada por el motor.
X2	Comando de la válvula de control de combustible	%	Apertura de la válvula que entrega combustible GNV.
X3	Flujo masa de gas	kg/h	Flujo de gas inyectado al motor.
X4	Flujo masa de aire	kg/h	Flujo de aire inyectado al motor.
X5	Posición del pedal de freno	1/0	Pedal de freno presionado: 0 y pedal de freno librado: 1.
X6	Porcentaje pedal del acelerador	%	Porcentaje de la presión del pedal de aceleración.
X7	Relación de cambio de la transmisión	1:#	Relación del cambio utilizado en la transmisión de velocidades.
X8	Temperatura aire del múltiple de admisión	°C	Temperatura del aire que ingresa al motor.
X9	Temperatura refrigerante del motor	°C	Temperatura del líquido refrigerante del motor.
X10	Velocidad del motor	rpm	Velocidad angular del cigüeñal del motor.
X11	Velocidad del turbocargador	rpm	Velocidad angular del eje del turbocargador.
X12	Velocidad vehicular	km/h	Velocidad del vehículo.
X13	Ocupación de personas	%	Personas transportadas con respecto a la

			capacidad total disponible.
X14	Rendimiento instantáneo*	km/l	Kilómetros que puede recorrer con 1 litro de gas.

\* Variable respuesta o dependiente.

En el desarrollo de estas dos primeras bases de datos hubo dos limitaciones, la primera es que las variables se midieron solo en un bus Articulado BLK y un Padrón debido a que las herramientas de diagnóstico disponibles en el taller para monitorear el motor Doosan del bus Articulado ZT no almacenan los datos medidos, y la segunda es que las pruebas de ruta se realizaron solo por línea L1 debido a que no fue permitido el uso de los equipos de diagnóstico en la línea L2 por cuestiones de seguridad y la accesibilidad de los usuarios.

Las otras dos bases de datos correspondientes a la Conducción se establecieron gracias a la información suministrada por los encargados del Programa de gestión de los conductores y el Programa de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, desde el mes de enero de 2012 hasta junio de 2015. Estas bases de datos se componen principalmente de los indicadores que evalúan la conducción de cada operador (ver Tabla 3) y otras variables que llegan a la plataforma lapflotas.com consideradas relevantes para el estudio, en la Tabla 10 se definen las variables que forman parte de estas dos bases de datos, las mediciones de cada una son un promedio de los valores tomados cada mes.

**Tabla 10:** Variables de Conducción.

Abrev.	Variable	Unidad de medida	Descripción de variables
X1'	Tipo de vehículo	Articulado (0), Padrón (1)	Clasificación por tipo de bus.
X2'	Cantidad excesos RPM	rpm	Es la cantidad de veces que el motor superó 2200 rpm.
X3'	Cantidad de frenadas bruscas	und	Cantidad de veces donde la desaceleración fue igual o mayor a 10 km/hora en un segundo.
X4'	Cantidad de aceleraciones	und	Cantidad de veces donde la aceleración

	bruscas		fue igual o mayor a 10 km/hora en un segundo.
X5'	Cantidad excesos de velocidad	und	Cantidad de veces que la velocidad sobrepasó el límite establecido por el cliente (60 km/hora).
X6'	Tiempo en conducción	h	Tiempo donde el vehículo está encendido viajando a más de 5km/h.
X7'	Tiempo en detención	h	Tiempo donde el vehículo está encendido viajando a menos de 5km/h.
X8'	Tiempo en zona verde	h	Tiempo en el cual las RPM permanecen en el rango óptimo (1300-2000 rpm) con una velocidad mayor a 15 km/hora.
X9'	Distancia recorrida	km	Distancia total que el vehículo ha recorrido.
X10'	Consumo de combustible*	m3	Volumen de gas consumido.

\* Variable respuesta o dependiente.

Nota: Las cuatro bases de datos con los valores medidos de las variables se encuentran en la carpeta de Análisis datos.

### 5.1.5.2 Análisis multivariante de los datos

Como bien se ha mencionado, el análisis multivariante de datos es una herramienta que permite comprender el comportamiento, relación y nivel de influencia de unas variables respecto a otras, lo que hace posible la reducción de dimensionalidad (o eliminación de variables) sin sacrificar importante explicación sobre la variabilidad de una variable dependiente (En adelante variable respuesta), que para el caso en estudio son el Rendimiento instantáneo y el Consumo de combustible por mes correspondientes a las bases de datos obtenidas por la Línea CAN y Conducción, respectivamente.

El análisis multivariante se ha desarrollado en Matlab versión R2014a y está dividido en 2 etapas, la primera busca identificar y eliminar outliers multivariantes no paramétricos (datos atípicos) y la segunda plantear un modelo de regresión lineal con las variables independientes más significativas que permitan estimar en un buen nivel las variables respuesta seleccionadas.

### 5.1.5.2.1 *Determinación de outliers multivariantes*

Gracias a los análisis que se realizan semanalmente a la información medida en tiempo real para establecer actividades por mantenimiento predictivo (ver la sección 4.2.2), se ha observado que una cantidad importante de múltiples códigos de falla se activan momentáneamente por ciertas condiciones puntuales bajo las cuales han operado los buses o medidas erróneas de un sensor, sin decir que un vehículo presenta fallas mecánicas debido a que estos no se vuelven a repetir. La repetición constante de un mismo código durante la operación de un bus en intervalos de días o semanas si pueden suponer fallas mecánicas, pero uno solo no necesariamente. Por motivos como estos se ha optado por realizar una identificación y eliminación de outliers multivariantes con el objetivo de representar mejor la operación normal de los buses con las cuatro bases de datos planteadas.

Los outliers multivariantes se han considerado como un importante y difícil problema para las ciencias físicas, químicas e ingeniería, debido a que pueden generar distorsiones significativas en estimadores, cambios de magnitud o los tipos de distribución afectando los resultados finales del estudio (Peña & Prieto, 2001). La mayoría de metodologías utilizadas para estimar outliers suponen normalidad y datos univariantes tal como el método de la distancia de Mahalanobis, por lo tanto, estas no son aplicables a las bases de datos desarrolladas para el caso de estudio debido a que tienen dimensión  $R^{15}$  y  $R^{10}$  por su número de variables. Así pues se ha utilizado la metodología de Curtosis-1 desarrollada en 2001 por D. Peña y F. Prieto, y posteriormente caracterizada como una de las más eficientes en comparación con otras como la Distancia Robusta de Mahalanobis y el Método de Filzmoser, Garrett y Reimann (Marcano & Fermín, 2013). Este método consiste en buscar  $p$  direcciones ortogonales de máxima Curtosis y  $p$  direcciones ortogonales de mínima Curtosis mediante la Ecuación 16. Se identifican como posibles valores atípicos aquellos que son extremos en tales direcciones.

$$\sum (y_i^{(j)} - \bar{y}^{(j)})^4 + \lambda(d_i' d_i - 1) \quad \text{Ecn. 16}$$

Luego de una eliminación provisional de los datos extremos en estas direcciones se calculan la media y la matriz de covarianzas con los datos no sospechosos, y finalmente se identifican los datos atípicos con la distancia de Mahalanobis calculada con las estimaciones no contaminadas.

Los cálculos para la Curtosis-1 se realizaron con base en la función `kur_rce(.)` integrada a un programa desarrollado en Matlab por Peña y Prieto (2001) y disponible en <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/dpena/dpenaweb.html>, allí tuvimos la dificultad en la estimación de la matriz de covarianzas puesto que salió mal condicionada y tampoco fue definida positiva, por lo tanto se le hizo la compresión propuesta por Ledoit y Wolf (Ledoit & Wolf, 2004) para obtener una estimación robusta de las covarianzas.

Los resultados obtenidos para las dos bases de datos construidas mediante la Línea CAN del vehículo se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11:** Detección de outliers en datos obtenidos de la Línea CAN del vehículo.

<b>Base de datos</b>	<b>Total datos iniciales</b>	<b>Número de outliers</b>	<b>Total datos sin outliers</b>
Articulado BLK	3028	1419	1609
Padrón	2925	1497	1428

De manera similar se encontraron los datos outliers de las bases de datos correspondientes a la Conducción y se muestran Tabla 12.

**Tabla 12:** Detección de outliers en datos obtenidos por Conducción.

<b>Base de datos</b>	<b>Total datos iniciales</b>	<b>Número de outliers</b>	<b>Total datos sin outliers</b>
Articulado BLK	20	0	20
Padrón	47	16	31

Finalmente, cabe resaltar que los datos de una variable alejados de su media no significan que sean outliers, ya que hacen parte de un conjunto de datos multivariantes y para que esto se cumpla es necesario tener en cuenta los valores de las demás variables.

### 5.1.5.2.2 *Identificación de variables explicativas mediante mínimos cuadrados*

Aquí se busca plantear modelos de regresión lineal utilizando solo las variables independientes más explicativas para estimar las variables respuesta seleccionadas, sin embargo, fueron detectados problemas de multicolinealidad en las variables independientes que fueron solucionados mediante dos métodos, el primero consiste en eliminar variables altamente correlacionadas bajo el criterio del Número de condición que se detalla más adelante y el segundo elimina las variables no significativas para el modelo mediante el procedimiento de backward stepwise regression. En el primero es posible descartar una o varias variables del modelo muy correlacionadas con otras bajo un criterio que va ligado a la conveniencia (desde un punto de vista práctico) para controlar el resultado de la variable respuesta, por ejemplo el Porcentaje pedal del acelerador y Comando de la válvula de control de combustible tienen una alta correlación (ver Tabla 13), pero es más sencillo para un sistema de gestión de la energía controlar el primero a través de una adecuada conducción que esta válvula. Por su parte, en el segundo método se eliminan variables independientes que benefician más la explicación del modelo de regresión sin tener en cuenta la utilidad práctica de las resultantes.

A continuación se analiza la multicolinealidad de cada base de datos y se plantean modelos de regresión lineal con las variables resultantes luego de realizar la exclusión inicial, posteriormente se implementa el procedimiento de *backward stepwise regression* y se obtienen los modelos de regresión definitivos.

**Multicolinealidad:** Una de las hipótesis que establecen los modelos de regresión lineal múltiple es que no existe relación lineal entre los regresores o variables debido a que la multicolinealidad perfecta no suele presentarse en la práctica y por ende tengan una relación aproximadamente lineal, en cuyo caso los estimadores que se obtengan pierden algo de precisión y por lo tanto las varianzas de los estimadores se elevan.

Concretamente el problema de multicolinealidad hace referencia a la existencia de relaciones aproximadamente lineales entre los regresores del modelo o altas correlaciones. Para saber si alguna de las cuatro bases de datos presenta este problema se calcula para cada una el Número de condición de la matriz de correlaciones, es decir, la raíz cuadrada del cociente entre



el máximo autovalor de dicha matriz y su mínimo autovalor, en la Tabla 13 se muestran los valores obtenidos.

**Tabla 13:** Número de condición de la matriz de correlaciones original.

Tipo	Base de datos	Número de condición
Línea CAN	Articulado BLK	49,06
	Padrón	57,23
Conducción	Articulado BLK	20,22
	Padrón	18,62

Se observa que los dos Números de condición correspondientes a las dos bases de datos tomadas de la Línea CAN son mayores a 30, esto indica que sus matrices de correlación se encuentran mal condicionadas y, efectivamente, se tienen problemas de multicolinealidad (Bailla & Grané, 2008). Para disminuirlo se identifican las variables que tienen correlaciones mayores a 0,85 y se suprime de las bases de datos una de las dos, en la Tabla 14 se muestran las variables más correlacionadas.

**Tabla 14:** Variables de la Línea CAN con mayor correlación.

Base de datos	Variable 1	Variable 2	Correlación
Articulado BLK	X1=Carga porcentual	X2= Comando de la válvula de control de combustible	0,94
	X1=Carga porcentual	X3= Flujo masa de gas	0,93
	X1=Carga porcentual	X6= Porcentaje pedal del acelerador	0,87
	X2= Comando de la válvula de control de combustible	X3= Flujo masa de gas	1,00
	X2=Comando de la válvula de control de combustible	X6= Porcentaje pedal del acelerador	0,90
	X3= Flujo masa de gas	X6= Porcentaje pedal del acelerador	0,89
	X3= Flujo masa de gas	X11=Velocidad del turbocargador	0,86

	X4=Flujo masa de aire	X11=Velocidad del turbocargador	0,96
Padrón	X1=Carga porcentual	X2= Comando de la válvula de control de combustible	0,93
	X1=Carga porcentual	X3=Flujo masa de gas	0,93
	X1=Carga porcentual	X6= Porcentaje pedal del acelerador	0,87
	X2= Comando de la válvula de control de combustible	X3=Flujo masa de gas	1,00
	X2= Comando de la válvula de control de combustible	X6= Porcentaje pedal del acelerador	0,93
	X3= Flujo masa de gas	X6= Porcentaje pedal del acelerador	0,92
	X4= Flujo masa de aire	X11=Velocidad del turbocargador	0,94
	X7=Relación de cambio de la transmisión	X12=Velocidad vehicular	0,87

De las bases de datos para el Articulado BLK y Padrón se eliminan las variables X1, X2 y X3 porque entre ellas hay una correlación alta y estas a su vez se correlacionan con X6, también se elimina X11 por que el turbocargador genera el flujo de X4, y finalmente, en el Padrón se elimina la variable X7 porque depende del comportamiento de X12. En resumen, se eliminan las variables X1, X2, X3 y X11 de la base de datos para el Articulado BLK, y las variables X1, X2, X3 X7 y X11 de la base de datos para el Padrón.

Luego se recalculan los nuevos Números de condición y se obtienen valores menores a 30 tal como se muestra en la Tabla 15, por ende el problema de multicolinealidad se resuelve.

**Tabla 15:** Número de condición de la matriz de correlaciones corregido.

Tipo	Base de datos	Número de condición
Línea CAN	Articulado BLK	8,61
	Padrón	10,20
Conducción	Articulado BLK	20,22
	Padrón	18,62

**Regresión lineal con exclusión de variables por multicolinealidad:** Utilizando la herramienta Matlab se han podido estimar los coeficientes  $\beta$  que acompañan las variables independientes de la Ecuación 1 sin tener en cuenta las variables que fueron excluidas en el punto anterior por presentar problemas de alta multicolinealidad. El código desarrollado utiliza la función “fitlm”, en las Tablas 16 y 17 se muestran los resultados obtenidos para el bus Articulado BLK y Padrón en cada tipo de base de datos.

**Tabla 16:** Estimación de los coeficientes  $\beta$  y bondad del ajuste para la Línea CAN excluyendo variables con multicolinealidad.

Abrev.	Variable	Articulado				Padrón			
		Estimación de $\beta$	SE	tStat	Pvalor	Estimación de $\beta$	SE	tStat	Pvalor
	Intercepto	0,7035	1,1730	0,600	0,5488	-1,5727	0,9714	-1,6190	0,1057
X1	Carga porcentual	Eliminada				Eliminada			
X2	Comando de la válvula de control de combustible	Eliminada				Eliminada			
X3	Flujo de la Masa de Gas	Eliminada				Eliminada			
X4	Flujo de Masa de Aire	-0,0541	0,0029	-18,346	2,25E-68	-0,0211	0,0050	-4,2200	2,60E-05
X5	Interruptor de Posición del Pedal del Freno	0,4502	0,1037	4,343	1,50E-05	-0,4451	0,1377	-3,2324	0,001256
X6	Por Ciento de Pedal o Palanca del Acelerador	-0,0078	0,0015	-5,280	1,47E-07	-0,0251	0,0028	-9,1001	2,97E-19
X7	Relación de Cambio de la Transmisión	-0,1515	0,0076	-19,958	2,62E-79	Eliminada			
X8	Temperatura de Aire del Múltiple de Admisión	-0,0013	0,0072	-0,175	0,8610	0,0117	0,0076	1,5369	0,1245
X9	Temperatura del Refrigerante del Motor	0,0117	0,0133	0,880	0,3789	0,0297	0,0101	2,9386	0,0034
X10	Velocidad del Motor	0,1275	0,0166	7,664	3,10E-14	0,0152	0,0158	0,9624	0,3360
X11	Velocidad del Turbocargador	Eliminada				Eliminada			
X12	Velocidad Vehicular	0,0412	0,0027	15,002	1,06E-47	0,0599	0,0025	24,3450	1,11E-109
X13	Ocupación de Personas	0,0017	0,0007	2,403	0,0164	0,0044	0,0015	2,9734	0,0030
<b>Información del modelo Articulado</b>		<b>Información del modelo Padrón</b>							
Número de observaciones: 1609, Grados de libertad del error: 1599		Número de observaciones: 1428, Grados de libertad del error: 1419							
Raíz cuadrada de la media del error: 0,914		Raíz cuadrada de la media del error: 0,835							
R-cuadrado: 0,677, Ajustado R-cuadrado: 0,675		R-cuadrado: 0,595, Ajustado R-cuadrado: 0,593							
F-estadístico vs. Constante del modelo: 372, p-valor = 0		F-estadístico vs. Constante del modelo: 260, p-value = 4,65e-272							

**Tabla 17:** Estimación de los coeficientes  $\beta$  y bondad del ajuste incluyendo todas las variables tomadas por Conducción.

Abrev.	Variable	Articulado				Padrón			
		Estimación de $\beta$	SE	tStat	Pvalor	Estimación de $\beta$	SE	tStat	Pvalor
	Intercepto	-13,1300	5,5013	-2,3867	0,036072	-13,8060	5,4490	-2,5337	0,0189
X1'	Tipo de vehículo	Eliminada				Eliminada			
X2'	Cantidad excesos RPM	0,01684	0,0277	0,6074	0,5559	-0,0377	0,0101	-3,7446	0,0011
X3'	Cantidad de frenadas bruscas	0,00927	0,0034	2,7505	0,018875	0,0106	0,0043	2,4777	0,0214
X4'	Cantidad de aceleraciones bruscas	-0,00453	0,0022	-2,0849	0,061181	0,0069	0,0039	1,7729	0,0901
X5'	Cantidad excesos de velocidad	-0,00843	0,0038	-2,1981	0,050251	-0,0006	0,0022	-0,2516	0,8037
X6'	Tiempo en conducción	-6,17680	3,9509	-1,5634	0,14625	-0,0296	0,6434	-0,0460	0,9637
X7'	Tiempo en detención	0,24685	0,1751	1,4098	0,18624	0,0132	0,0424	0,3120	0,7580
X8'	Tiempo en zona verde	1,65880	0,6297	2,6343	0,02323	1,7013	0,6542	2,6005	0,0163
X9'	Distancia recorrida	4,18590	2,5537	1,6392	0,12944	0,5363	0,4247	1,2627	0,2199
<b>Información del modelo Articulado</b>		<b>Información del modelo Padrón</b>							
Número de observaciones: 20, Grados de libertad del error: 11		Número de observaciones: 31, Grados de libertad del error: 22							
Raíz cuadrada de la media del error: 0.197		Raíz cuadrada de la media del error: 0.0463							
R-cuadrado: 0.659, Ajustado R-cuadrado: 0.41		R-cuadrado: 0.898, Ajustado R-cuadrado: 0.86							
F-estadístico vs. Constante del modelo: 2.65, p-valor = 0.0682		F-estadístico vs. Constante del modelo: 24.1, p-valor = 3.55e-9							

De la Tabla 16 se puede ver que las variables independientes tomadas de la Línea CAN explican la variabilidad del Rendimiento instantáneo en el Articulado BLK y Padrón un 67,5% y 59,3%, respectivamente (Ajustado R-cuadrado). Por su parte, la variabilidad del Consumo de combustible correspondiente a la base de datos por Conducción es explicada en el Articulado y Padrón un 41,0% y 86,0%, respectivamente como se evidencia en la Tabla 17.

Así pues, los modelos que de regresión lineal múltiple quedan de la siguiente manera:

**Tabla 18:** Modelos de regresión lineal excluyendo variables por multicolinealidad.

Modelo	Bondad del ajuste
<b>Variabes línea CAN Articulado BLK</b>	67,5%
$X_{14} = 0,70 - 0,05X_4 + 0,45X_5 - 0,01X_6 - 0,15X_7$ $- 0,001X_8 + 0,01X_9 + 0,13X_{10} + 0,04X_{12}$ $+ 0,002X_{13}$	
<b>Variabes línea CAN Padrón</b>	59,3%
$X_{14} = -1,57 - 0,02X_4 - 0,450X_5 - 0,03X_6 + 0,01X_8$ $+ 0,03X_9 + 0,02X_{10} + 0,06X_{12}$ $+ 0,004X_{13}$	

<b>Variabes Conducción Articulado BLK</b>	41,0%
$X10' = -13,13 + 0,02X2' + 0,01X3' - 0,004X4' - 0,008X5' - 6,18X6' + 0,24X7' + 1,66X8' + 4,19X9'$	
<b>Variabes Conducción Padrón</b>	86,0%
$X10' = -13,81 - 0,04X2' + 0,01X3' + 0,007X4' - 0,0006X5' - 0,03X6' + 0,01X7' + 1,70X8' + 0,54X9'$	

**Regresión lineal con exclusión de variables por backward stepwise regression:**

Generalmente las bases de datos contienen variables independientes que no tienen suficiente influencia sobre la variabilidad de una variable respuesta, para detectarlas en las 4 bases de datos es necesario definir primero un nivel de significancia del 90%, entonces  $\alpha$  corresponde a ese 10% restante asociado a la probabilidad máxima de equivocación para rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ). Esto significa que no se deben aceptar variables con valores Pvalor mayores a 5% ( $Pvalor > \alpha/2$ ) para cumplir el valor de significancia establecido, ya que de lo contrario no se tendrían argumentos para rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ) y por lo tanto se aceptaría. En pocas palabras hay tener en cuenta la siguiente relación:

Si  $Pvalor \leq \alpha$ , Rechazar  $H_0$  al nivel  $\alpha$

Si  $Pvalor > \alpha$ , No rechazar  $H_0$  al nivel  $\alpha$

Cuyas hipótesis se han planteado así:

$$H_0: \beta_i = 0$$

$$H_1: \beta_i \neq 0$$

El proceso de eliminación de variables no significativas parte de los resultados que se muestran en las tablas 16 y 17, donde se aprecian variables con valores Pvalor mayores a 5%. Se elimina primero la variable con mayor Pvalor, se recalcula la regresión lineal mediante la función de Matlab "fitlm" y se evalúan nuevamente el cambio de los Pvalor en las otras variables, luego se elimina la siguiente con mayor Pvalor y se evalúa nuevamente el cambio de

las variables restantes, este proceso se realiza hasta que las variables que hayan quedado tengan valores de Pvalor menores a 5%.

Adicionalmente, se han determinado y eliminado el 5% de los datos con mayores residuos (e) en la regresión lineal asociados a la diferencia existente entre los valores reales de las variables respuesta y sus valores estimados, esto permite que los datos resultantes se ajusten mejor al modelo de regresión lineal planteado. Durante el desarrollo de este paso se encontró que los residuos eliminados no cumplen la hipótesis de normalidad utilizando el test de Jarque-Bera en Matlab, sin embargo no se visualiza como gran problema puesto que están muy cercanos del valor cero.

En las tablas 19 y 20 se muestran las variables más significativas para sus correspondientes variables respuesta con Pvalor menores a 5% teniendo en cuenta la depuración del 5% en los datos con mayores residuos.

**Tabla 19:** Estimación de los coeficientes  $\beta$  y bondad del ajuste de las variables significativas para la Línea CAN.

Abrev.	Variable	Articulado				Padrón			
		Estimación de $\beta$	SE	tStat	Pvalor	Estimación de $\beta$	SE	tStat	Pvalor
	Intercepto	1,5588	0,1165	13,3850	1,08E-38	-0,1717	0,5184	-0,3311	0,7406
X1	Carga Porcentual	Eliminada				Eliminada			
X2	Comando de la Válvula de Control de Combustible	Eliminada				Eliminada			
X3	Flujo de la Masa de Gas	Eliminada				Eliminada			
X4	Flujo de Masa de Aire	-0,0446	0,0019	-23,3520	3,15E-103	-0,0195	0,0021	-9,1362	2,31E-19
X5	Interrupor de Posición del Pedal del Freno	0,4870	0,0693	7,0255	3,21E-12	-0,3037	0,0622	-4,8811	1,18E-06
X6	Por Ciento de Pedal o Palanca del Acelerador	-0,0033	0,0010	-3,4990	0,0005	-0,0166	0,0014	-12,0840	5,39E-32
X7	Relación de Cambio de la Transmisión	-0,1296	0,0049	-26,4350	6,80E-127	Eliminada			
X8	Temperatura de Aire del Múltiple de Admisión	Eliminada				Eliminada			
X9	Temperatura del Refrigerante del Motor	Eliminada				0,0173	0,0058	2,9728	0,0030
X10	Velocidad del Motor	0,0883	0,0109	8,1138	1,01E-15	Eliminada			
X11	Velocidad del Turbocargador	Eliminada				Eliminada			
X12	Velocidad Vehicular	0,0382	0,0017	22,3940	3,80E-96	0,05391	0,0013	40,3540	4,07E-234
X13	Ocupación de Personas	Eliminada				0,00437	0,0008	5,6266	2,23E-08
<b>Información del modelo Articulado</b>		<b>Información del modelo Padrón</b>							
Número de observaciones: 1518, Grados de libertad del error: 1510		Número de observaciones: 1355, Grados de libertad del error: 1348							
Raíz cuadrada de la media del error: 0,584		Raíz cuadrada de la media del error: 0,473							
R-cuadrado: 0.769, Ajustado R-cuadrado: 0.768		R-cuadrado: 0.75, Ajustado R-cuadrado: 0.749							
F-estadístico vs. Constante del modelo: 719, p-valor = 0		F-estadístico vs. Constante del modelo: 673, p-value = 0							

**Tabla 20:** Estimación de los coeficientes  $\beta$  y bondad del ajuste de las variables significativas para la Conducción.

Abrev.	Variable	Articulado				Padrón			
		Estimación de $\beta$	SE	tStat	Pvalor	Estimación de $\beta$	SE	tStat	Pvalor
	Intercepto	-6,4984	3,7701	-1,7236	0,1029	-11,4100	4,9973	-2,2833	0,0305
X1'	Tipo de vehículo	Eliminada				Eliminada			
X2'	Cantidad excesos RPM	Eliminada				-0,0178	0,0068	-2,5953	0,0151
X3'	Cantidad de frenadas bruscas	0,0036	0,001466	2,4288	0,0265	Eliminada			
X4'	Cantidad de aceleraciones bruscas	Eliminada				Eliminada			
X5'	Cantidad excesos de velocidad	Eliminada				Eliminada			
X6'	Tiempo en conducción	Eliminada				Eliminada			
X7'	Tiempo en detención	Eliminada				Eliminada			
X8'	Tiempo en zona verde	1,4052	0,4554	3,0855	0,0067	1,3393	0,5840	2,2933	0,0298
X9'	Distancia recorrida	Eliminada				0,7103	0,0790	8,9925	1,32E-09
<b>Información del modelo Articulado</b>					<b>Información del modelo Padrón</b>				
Número de observaciones: 20, Grados de libertad del error: 17					Número de observaciones: 31, Grados de libertad del error: 27				
Raíz cuadrada de la media del error: 0.201					Raíz cuadrada de la media del error: 0.051				
R-cuadrado: 0.449, Ajustado R-cuadrado: 0.384					R-cuadrado: 0.847, Ajustado R-cuadrado: 0.83				
F-estadístico vs. Constante del modelo: 6,92, p-value = 0.0063					F-estadístico vs. Constante del modelo: 50, p-value = 3,75e-11				

Al comparar los parámetros Ajustado R-cuadrado de las tablas 16 y 19 correspondientes a la Línea CAN se observa que hubo un incremento en la explicación de la variable Rendimiento instantáneo en el Articulado BLK que pasó de 67,5% a 76,8% y en el Padrón de 59,3% a 74,9%, además de una moderada reducción en el número de variables independientes. Por otro lado, entre las tablas 17 y 20 se encuentra una disminución en los parámetros Ajustado R-cuadrado, pasando a explicar el Consumo de combustible por mes en el Articulado BLK de 41% a 38,4% y en el Padrón de 86% a 83%, a pesar de ello se logró que gran parte de las variables pudieran ser excluidas y el modelo se simplificara. En la Tabla 21 se muestran los modelos de regresión lineal múltiple consolidados.

**Tabla 21:** Modelos de regresión lineal excluyendo variables por backward stepwise regression.

Modelo	Bondad del ajuste
<b>Variabes línea CAN Articulado BLK</b>	76,8%
$X_{14} = 1,55 - 0,04X_4 + 0,49X_5 - 0,003X_6 - 0,13X_7 + 0,09X_{10} + 0,038X_{12}$	
<b>Variabes línea CAN Padrón</b>	74,9%
$X_{14} = -0,17 - 0,02X_4 - 0,30X_5 - 0,02X_6 + 0,02X_9 + 0,05X_{11} + 0,004X_{13}$	
<b>Variabes Conducción Articulado BLK</b>	38,4%
$X_{10}' = -6,50 + 0,004X_3' + 1,41X_8$	

Variables Conducción Padrón		
$X10' = -11,41 - 0,02X2' + 1,34X8' + 0,71X9'$		83,0%

### 5.1.6 Recomendaciones para las actividades del plan de acción

Partiendo de los modelos planteados en la Tabla 21, se ha realizado un análisis estadístico-descriptivo a cada una de las variables explicativas para conocer su comportamiento y plantear recomendaciones enfocadas a incrementar los valores promedio de la variables respuesta X14 (Rendimiento instantáneo) y disminuir X10' (Consumo de combustible por mes).

El plan de acción para esta flota de buses se ha dividido en tres áreas que son la conducción, la logística de la operación y el funcionamiento de los componentes, cada una de las variables independientes que resultaron ser significativas fueron clasificadas en alguna de estas tres, en la Tabla 22 se muestra la asignación realizada.

**Tabla 22:** Asignación de variables de acuerdo a su rol en el bus.

		CONDUCCIÓN		LOGÍSTICA		FUNCIONAMIENTO	
		ABREV	VARIABLE	ABREV	VARIABLE	ABREV	VARIABLE
ARTICULADO	X5	Posición del pedal de freno				X4	Flujo masa de aire
	X6	Porcentaje pedal del Acelerador					
	X7	Relación de cambio de la transmisión					
	X10	Velocidad del motor					
	X12	Velocidad vehicular					
	X3'	Cantidad de frenadas bruscas					
	X8'	Tiempo en zona verde					
PADRÓN	X5	Posición del pedal de freno	X13	Ocupación de personas	X9	Temperatura refrigerante del motor	
	X6	Porcentaje pedal del acelerador	X9'	Distancia recorrida	X4	Flujo masa de aire	
	X12	Velocidad vehicular					
	X8'	Tiempo en zona verde					
	X2'	Cantidad excesos RPM					

#### 5.1.6.1 Conducción

Una conducción eficiente busca optimizar el uso del combustible mediante una serie de técnicas aplicadas a los vehículos y sobre todo el fomento de una adecuada actitud en los conductores.



La propuesta de conducción eficiente se basa en los comportamientos de las variables mostradas en la Tabla 22, algunas de ellas resultan ser significativas para ambos tipos de buses tales como X5, X6, X12 y X8', y otras más particulares como X7, X10 y X3' en el Articulado BLK y X2' en el Padrón. En las tablas 2A del Anexo 2 y 3A del Anexo 3 se han estimado algunos parámetros descriptivos que permiten caracterizar el comportamiento de las variables de conducción en ambos tipos de buses, además de una serie de gráficas donde se relaciona cada una de ellas con el combustible en términos del Rendimiento instantáneo y del Consumo de combustible por mes con los respectivos histogramas de frecuencias. Esta información es clave porque permite visualizar la manera como son conducidos los vehículos actualmente y aquellos valores que las variables pueden alcanzar para lograr ahorros de combustible.

- **Posición del pedal de freno:** En los buses Articulado BLK y Padrón se obtuvieron medias en esta variable de 0,22 y 0,12 respectivamente, esto señala que al estar más cercanas del valor 0 que del 1 el pedal de freno estuvo más tiempo liberado (0) que presionado (1), sin embargo el Padrón operó con menos aplicaciones del freno. En relación con la variable Rendimiento instantáneo se observa que entre menos activaciones del pedal de freno más crece el rendimiento que se traduce en ahorro de combustible, entonces se recomienda que durante la conducción de ambos vehículos se trate de mantener una media por debajo de 0,12. Casos como frenar bruscamente cuando a lo lejos ha observado alto tráfico o mantener distancias muy cortas entre vehículos pueden aumentar el consumo de combustible debido a que habrá un suministro de combustible hacia el motor alto casi hasta el punto de frenado.
- **Porcentaje pedal del acelerador:** Se observa que en las pruebas realizadas el 75% del tiempo el pedal de acelerador en el bus Articulado BLK estuvo presionado por debajo de 84%, mientras que en el Padrón a menos del 68% y mantuvieron unas medias similares cercanas a 49%. Valores altos en el Rendimiento instantáneo se pueden obtener cuanto menos presión se le aplique al pedal del acelerador, sin embargo los fabricantes de las transmisiones recomiendan aplicar rápidamente el pedal de aceleración al 100% durante los arranques en vías planas y luego soltarlo suavemente, la razón es porque da una activación rápida del "Lock Up" (componente utilizado para unir la turbina del convertidor de par y la volante que acopla con el

cigüeñal del motor) y reducir la fricción fluida que se da internamente; adicionalmente, cuando los dos tipos de vehículos se encuentran en una pendiente es recomendable mantener la velocidad del motor a 1350rpm, debido a que es en esta condición donde se genera el torque máximo y también mayor rendimiento en el combustible como se mostrará más adelante, llevarlo a revoluciones mayores representaría un consumo mayor de combustible con la salida de un menor torque. En el Anexo 4 se encuentran las curvas de desempeño para los motores de los buses Articulados BLK, ZT y Padrón.

- **Velocidad vehicular:** Se evidencia en la tabla de frecuencias que el 75% del tiempo que duraron las pruebas ambos buses mantuvieron una velocidad entre 0km/h y 30km/h, adicionalmente el Rendimiento instantáneo presentaba un incremento cuando se alcanzaron velocidades cercanas a los 12km/h, 30km/h y 50km/h. Teniendo en cuenta que la mayor parte del tiempo los vehículos se mueven entre 0km/h y 30km/h, se recomienda que los conductores alcancen y mantengan velocidades de 12km/h cuando no es posible viajar muy rápido y, mientras las condiciones externas lo permitan, intentar mantener 37km/h o 50km/h, lo cual es posible en gran parte de la ruta por que la línea L1 y parte de la L2 tienen vías y pasos semafóricos exclusivos que le permiten al conductor controlar mejor su velocidad.
- **Relación de cambio de la transmisión:** El comportamiento obtenido entre esta variable y el Rendimiento instantáneo en el Articulado BLK muestra que al mantener relaciones de transmisión bajas se puede optimizar combustible. Dado que las transmisiones de los buses son automáticas y electrónicas, es posible reprogramar los módulos TCM (Transmission Control Module) para que realicen los cambios de marcha más rápidos en vías planas y alcancen las relaciones bajas; para el caso de los ascensos, los conductores deben realizar una limitación manual a primera marcha desde la botonera de cambios y luego mantener las revoluciones del motor cercanas a los 1350rpm para alcanzar el torque máximo del motor. A pesar de que esta variable resultó ser significativa solo para el Articulado BLK se podría implementar la misma recomendación en el Padrón con el fin de obtener mejores rendimientos.
- **Velocidad del motor:** Esta variable es significativa para el bus Articulado BLK, sin embargo la siguiente recomendación puede servir también para el Padrón. El gráfico

donde se relaciona esta variable con el Rendimiento instantáneo muestra que hay dos velocidades de motor donde se optimiza el combustible que son 700rpm y 1200rpm, la primera corresponde al ralentí que se da cuando el vehículo está detenido, pero mantener el motor a esta velocidad debe evitarse teniendo en cuenta que hay un consumo que finalmente no hace trabajo en términos de desplazamiento, por el contrario la segunda velocidad si es recomendable alcanzarla y mantenerla mientras el vehículo se encuentra en una vía plana y el TCM de la transmisión reprogramado para alcanzar cambios altos rápidamente, además aplica también cuando está bajo una condición de ascenso por una vía puesto que entre las 1200rpm y 1300rpm se alcanza el torque máximo del motor tal como se evidencia en las curvas de desempeño incluidas en el anexo 4 .

- **Tiempo en zona verde:** La zona verde está definida entre 1300rpm y 2000 rpm, sin embargo desde el punto de vista del rendimiento en el combustible debería estar definida entre 1100 y 1500rpm teniendo en cuenta el comportamiento de la variable Velocidad del motor. En este sentido se recomienda mantener por más tiempo una velocidad del motor durante el proceso de conducción en este nuevo rango, y ser tenido en cuenta en las programaciones de los TCM para que sea dentro de este dónde se realicen los cambios de marcha. Finalmente, esta variable resultó ser significativa solo para el Articulado BLK, sin embargo podría traer mejoras en el rendimiento del bus Padrón.
- **Cantidad excesos RPM:** Exceder constantemente la velocidad gobernada del motor correspondiente a 2200rpm representará gastos de combustible innecesarios debido a que su rango de operación está dado entre 700 y 2200rpm. Sobrepassar el límite máximo disminuye la vida útil del motor y ocasionaría un aumento innecesario en el consumo de combustible puesto que contrario a lo que se piensa comúnmente, no se logra una mayor potencia tal como lo demuestran las respectivas gráficas para cada motor relacionadas en el anexo 4, más evidentemente la del Articulado BLK con motor Cummins ISLG 320HP donde a partir de los 2100rpm la potencia cae abruptamente. Esta variable aunque resultó ser significativa solo para el Consumo de combustible del bus Padrón es recomendable no exceder las rpm de cualquier motor más allá de su máximo permisible por las razones ya indicadas.

- **Cantidad de frenadas bruscas:** Las frenadas bruscas además de ser una variable significativa para el Consumo de combustible en el Articulado BLK también va en contra de la seguridad de los usuarios. La recomendación es retroalimentar a los conductores para mantener una operación suave en cualquier tipo de vehículo y una actitud a la defensiva.

### **5.1.6.2 Logística**

La operación de los buses depende de un sinnúmero de factores que deben ser tenidos en cuenta para cumplir adecuadamente con la prestación del servicio y la rentabilidad de la empresa, esto incluye por ejemplo el número de buses que deben operar en las diferentes horas del día, mantener el IPK del sistema, ajustarse a la demanda del servicio, el número de rutas disponibles, entre otras. En este apartado se analizará el comportamiento de las variables X13 y X9' que resultaron ser significativas para los modelos de regresión lineal en el bus Padrón. En la tabla 3B del Anexo 3 se encuentran algunos parámetros descriptivos que fueron estimados y las gráficas donde se relaciona cada una de ellas con el combustible en términos del Rendimiento instantáneo y el Consumo de combustible por mes, además de los respectivos histogramas de frecuencias.

- **Ocupación de personas:** Se observa en las respectiva gráfica del Padrón que ocupar los vehículos con usuarios a más del 20% de la capacidad total disminuye el Rendimiento instantáneo, sin embargo los resultados obtenidos en Figura 19 para los dos tipos de buses demuestran que por el contrario a mayor número de usuarios transportados menor es el combustible asignado a cada uno, y entonces hay un mayor ahorro de combustible en términos del servicio prestado. Mantener un IPK relativamente alto podría beneficioso para los intereses de la empresa, pero debe tenerse en cuenta la percepción en la calidad del servicio que tienen los usuarios para evitar desestimular el uso de este sistema de transporte.
- **Distancia recorrida:** Es claro que a mayor distancia recorrida mayor será el Consumo de combustible de un vehículo, sin embargo la relación entre ellas va muy ligada al comportamiento de otras variables asociadas al tipo conducción, el funcionamiento de

sus componentes eléctricos y mecánicos, y la logística. Lo que se espera de la implementación del sistema de gestión de la energía es precisamente que se evidencie una reducción en el consumo de combustible manteniendo por ejemplo el número de kilómetros que se recorren diariamente.

### **5.1.6.3 Funcionamiento**

La manera cómo funcionan algunos componentes del vehículo puede afectar el consumo de combustible, la ventaja de algunos de ellos es que pueden ser controlados desde la programación de sus módulos ECU para que funcionen de cierta manera, o en el caso de que no fuesen manipulables entonces garantizándoles una adecuada operación. De las bases de datos planteadas se identificaron las variables X4 y X9 como significativas, la primera para los dos tipos de buses y la segunda solo para el Padrón. En las tablas 2B del Anexo 2 y 3C del Anexo 3 se encuentran también algunos parámetros descriptivos que fueron estimados y las gráficas donde se muestra el comportamiento de cada una de ellas con el combustible en términos del Rendimiento instantáneo y el Consumo de combustible por mes, además de los respectivos histogramas de frecuencias.

**Flujo masa de aire:** El turbocargador es un elemento que envía aire forzado al sistema de admisión e incrementa la potencia del motor, a mayor velocidad de su eje central, turbina y compresor mayor es el caudal de aire que envía al motor. En las tablas 2B y 3C de los anexos se observa que el Rendimiento instantáneo crece cuanto menos flujo de aire ingresa al motor, por su parte los parámetros descriptivos señalan que el 75% del tiempo que duró la prueba de ruta en el Padrón el flujo de masa de aire se mantuvo por debajo de los 346,4kg/h, mientras que el Articulado BLK a menos de 450,0kg/h, los cuales pueden ser reducidos mediante una conducción eficiente y apropiada logística en la operación para evitar que alcance altas velocidades innecesarias que sobre alimenten el motor y por lo tanto el envío de combustible para mantener una mezcla estequiométrica. Se debe tener en cuenta que el Articulado BLK y Padrón tienen potencias diferentes (ver anexo 4) y no se debe esperar en el sistema de gestión de la energía que mantengan valores iguales.

- **Temperatura refrigerante del motor:** Variable significativa para el bus Padrón. De acuerdo con el comportamiento evidenciado en la tabla 3C del Anexo 3, mantener

temperaturas de operación en el motor cercanas a 88,5°C disminuiría el consumo de combustible. Con una media y mediana que rondan los 89,5°C, el bus Padrón mantiene una temperatura de operación no muy alejada a la ideal que se podría alcanzar reprogramando la ECU del sistema de ventiladores a 88,5°C y llevando a cabo mantenimientos más frecuentes del radiador e intercooler o implementando modificaciones en el compartimiento del motor que permitan aislar del motor componentes como el catalizador de gases de escape que acumula gran cantidad de calor o la instalación de rejillas que aumenten el flujo de aire fresco al interior de esta zona.

## 5.2 Implementación y operación

En esta fase se definen los criterios mediante los cuales la empresa deberá operar en el marco del SGE manteniendo como uno de sus focos el mejoramiento continuo del desempeño energético.

De Laire (2013) señala que cada una de las operaciones relacionadas al uso significativo de la energía deberá poseer instructivos de trabajo en los que se especifiquen:

- Criterios de operación y mantenimiento.
- Variables relevantes del proceso.
- Parámetros de control.
- Responsabilidades de ejecución.
- Métodos de control y acción en caso de emergencias.
- Registros y sistemas de gestión de la información.
- Sistemas de monitoreo.

Además de un sistema de controles operacionales acordes a los temas y aspectos considerados en la política, objetivos y planes de acción.

El SGE planteado para el sistema de buses BRT del Metro de Medellín fue dividido en tres áreas operacionales que son Conducción, Logística y Funcionamiento, las dos primeras son altamente dependientes de las personas encargadas tales como conductores, capacitadores de

conducción y los programadores de la operación, mientras que la última además de los conductores, depende también de los mantenedores de los buses.

En principio, las personas encargadas del SGE deberán capacitar a los líderes de cada una de las áreas sobre cómo pueden operar eficientemente teniendo en cuenta las recomendaciones dadas en el plan de acción. También es necesario establecer en conjunto con ellos algunos indicadores que les permitan llevar un control permanente sobre las actividades que realiza cada uno de sus integrantes, de esta manera se pueden identificar quienes o qué actividades no se alinean con el plan establecido y ser reajustado si es necesario.

Los líderes de cada área deberán transmitir los lineamientos a los que apliquen en el SGE a su personal encargado a través de charlas que impacten no solo en los beneficios esperados sobre el combustible, si no también aquellos que son ambientales, económicos, de salud, calidad de vida, entre otros, el objetivo fundamental es establecer los nuevos lineamientos de operación y promocionar una conciencia y actitud en cada integrante, clientes y proveedores de productos y servicios, alineada con esta nueva política organizacional.

### **5.3 Verificación**

El objetivo fundamental es asegurar la conformidad del SGE mediante la mejora continua de su eficacia, por lo tanto se definen e implementan controles y sistemas de reporte que permitan a la empresa realizar un seguimiento de su desempeño energético y, adicional al control operacional, donde el foco está en la cotidianidad de los procesos, además de tener una mirada global de períodos que permiten detectar otros aspectos del desempeño energético (De Laire, 2013).

Basados en los análisis realizados a cada variable significativa en el plan de acción, y teniendo en cuenta que estas son monitoreadas permanentemente por los sensores de algunos sistemas como el motor, frenos, transmisión, etc., y transmitidas por la línea CAN del vehículo, se propone la implementación de un seguimiento en tiempo real para las variables significativas del SGE, adicional a las que actualmente se registran para el programa de gestión de los conductores (ver Tabla 3), e incluirlas a la plataforma [laplotas.com](http://laplotas.com) o [qsrt.cumandes.com](http://qsrt.cumandes.com) clasificadas por área (Conducción, Logística y Funcionamiento).

El seguimiento de cada variable en estas plataformas virtuales va a permitir a cada área responsable evaluar su desempeño mediante la comparación entre valores medidos y valores objetivo. En la Tabla 23 se ha estimado el impacto que tienen sobre el Rendimiento instantáneo el promedio de los valores medidos en las pruebas de ruta y unos que pueden ser objetivos, los valores de cada variable asociados a la columna “promedio actual” corresponden a la media de su respectiva base de datos sin tener en cuenta aquellos datos cuando el bus estuvo detenido (Velocidad vehicular = 0km/h), y los valores asociados al objetivo se han establecido teniendo en cuenta las recomendaciones dadas en el plan de acción.

**Tabla 23:** Valores base y objetivo para las variables de Línea CAN.

ARTICULADO				PADRÓN			
Variables		Objetivo	Promedio actual	Variables		Objetivo	Promedio actual
X4	Flujo masa de aire x 10 [kg/h]	25,00	29,51	X4	Flujo masa de aire x 10 [kg/h]	20,00	26,22
X5	Posición del pedal de freno [lib. 0 / pres. 1]	0,22	0,22	X5	Posición del pedal de freno [lib. 0 / pres. 1]	0,12	0,12
X6	Porcentaje pedal del acelerador [%]	40,00	49,16	X6	Porcentaje pedal del acelerador [%]	40,00	49,31
X7	Relación de cambio de la transmisión [1: #]	2,00	3,67	X9	Temperatura refrigerante del motor [°C]	88,50	89,87
X10	Velocidad del motor x10 [rpm]	13,00	11,78	X12	Velocidad vehicular [km/h]	30,00	23,66
X12	Velocidad vehicular [km/h]	30,00	20,22	X13	Ocupación de personas [%]	33,00	30,99
	Rendimiento instantáneo (km/l)	2,45	1,52		Rendimiento instantáneo (km/l)	2,03	1,43

Un tratamiento similar se realizó con los modelos de regresión lineal obtenidos de las bases de datos de Conducción, el “promedio actual” de cada variable también corresponde a la media de su respectiva base de datos, y los valores objetivo se han establecido teniendo en cuenta la manera como se comporta cada una respecto al Combustible consumido.

En la Tabla 24 observa que al dar valores objetivo en el modelo de regresión del bus Padrón para disminuir el Consumo de combustible se genera por el contrario un incremento, esto se debe a que las variables X8’ y X9’ en su respectivo modelo de regresión lineal cuando se incrementan hacen crecer el Consumo de combustible. En el Articulado BLK por su parte se espera una reducción influenciado principalmente por la variable X3’, ya que X8’ al igual que en el Padrón cuando aumenta también lo hace el consumo.



**Tabla 24:** Valores base y objetivo para las variables de Conducción.

ARTICULADO				PADRÓN			
Variables		Objetivo	Promedio actual	Variables		Objetivo	Promedio actual
X3'	Cantidad frenadas bruscas / 10 [und]	40,00	84,82	X2'	Cantidad excesos rpm x 10 [und]	4,00	5,51
X8'	Tiempo en zona verde x 10 [h]	8,30	8,24	X8'	Tiempo en zona verde x 10 [h]	9,00	8,88
	Consumo de combustible por mes x 1000 Objetivo (m3)	5,31	5,39	X9'	Distancia recorrida x 1000 [km]	5,32	5,32
					Consumo de combustible por mes x 1000 Objetivo (m3)	4,35	4,16

Finalmente, cabe señalar que los resultados de la gestión realizada por cada una de las tres áreas sobre sus variables independientes asignadas se deben ver reflejados en los los tres indicadores IDEn y por lo tanto en los objetivos planteados inicialmente, en el caso de no lograr los resultados esperados deben plantearse no conformidades por parte del equipo encargado del SGE para replantear en conjunto con la alta dirección las actividades y estrategias del caso.

## 5.4 Revisión de la alta dirección

La alta dirección debe mostrar evidencia de su compromiso con el desarrollo e implementación del sistema de gestión de la energía y la mejora continua de su eficacia, se espera de ella que haya comunicación constante sobre la importancia de lograr reducciones en el combustible consumido, establecimiento de una política energética, planteamiento de los objetivos, realización de revisiones periódicas y aseguramiento de recursos.

Para que la alta dirección lleve a cabo sus responsabilidades es necesario que haya una información de entrada que debe suministrarla el grupo encargado del SGE, esta contiene el nivel de cumplimiento de los objetivos, resultados de auditorías, estado de las acciones correctivas y preventivas, desempeño energético esperado para el próximo periodo, recomendaciones de mejora, indicadores IDEn, revisiones anteriores, política general, requisitos legales, entre otros.

Dicha información debe ser revisada periódicamente cada seis meses por la alta dirección, puesto que los indicadores IDEn señalan que transcurrido este tiempo es necesario replantear los objetivos teniendo en cuenta la demanda creciente de usuarios y por lo tanto el aumento en el combustible consumido asociado. En el CUSUM las proyecciones al 2017 cruzan el valor

cero aproximadamente a los seis meses, al igual que la Eficiencia base 100 cruza el valor 100% en ese mismo periodo de tiempo, es decir, cuando la flota de buses se pasa a la zona de ineficiencia en el combustible.

Finalmente, los resultados de la revisión dada en conjunto con la alta dirección deben incluir todas las decisiones y acciones relacionadas a los cambios en el desempeño en el uso del combustible, objetivos, metas, política energética, indicadores IDEn y tipo de recursos.

# Conclusiones y recomendaciones

## 6.1 Conclusiones

El tipo de energía y los niveles de consumo de una empresa dependen fundamentalmente de su nivel tecnológico, el uso interno y las regulaciones legales impuestas como políticas de gobierno para reducir por ejemplo emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes a la atmósfera, además de otras asociadas a las relaciones de costo - beneficio para la producción de un producto o servicio, el aprovechamiento de ventajas o exoneraciones a impuestos dados por los gobiernos, entre otras. Ese tipo de cosas ha motivado en las empresas cierto desarrollo interno y reestructuración de sus estrategias, sin embargo es necesario importantes inversiones de dinero y conocimiento que por lo general no se tienen disponibles rápidamente, entonces la implementación de un sistema de gestión de la energía se hace mucho más viable puesto que permite lograr resultados más rápidos, evidentes y con una inversión relativamente pequeña, además de la apertura de beneficios tributarios.

El programa de gestión de la energía propuesto para los buses BRT de la empresa Metro de Medellín sigue los lineamientos de la norma ISO 50001, en primer lugar porque fue posible establecer objetivos para el ahorro de combustible alcanzables con base en aquellos meses donde hubo menores consumos con respecto a otros, y cuyo potencial de ahorro en Articulados y Padrones de aproximadamente 20.000m<sup>3</sup> y 15.000m<sup>3</sup>, respectivamente.

Adicionalmente, la planificación que se ha realizado para este sistema de gestión tiene una vasta información que fue obtenida de los sistemas electrónicos de los vehículos y los programas que componen la administración de la flota, lo cual ha hecho necesario incluir un análisis multivalente de datos como herramienta que posibilita enfocar de manera efectiva los esfuerzos de una organización asociados al ahorro energético para el cumplimiento de los objetivos, ya que permite identificar aquellas variables que no afectan significativamente el consumo de combustible, eliminarlas y trabajar solamente sobre aquellas que si son importantes, y sobre estas plantear actividades, responsables y metas orientadas a optimizar las variables respuestas.

Así pues, se establecieron cuatro modelos estadísticos de regresión lineal, dos de ellos que predicen el Rendimiento instantáneo con bondades en el ajuste de 76,8% y 74,6% para el Articulado BLK y Padrón, respectivamente y los otros dos para el Consumo de combustible por mes con bondades en el ajuste del 38,4% y 83,0% para el Articulado BLK y Padrón, respectivamente. Teniendo en cuenta que uno de los últimos dos modelos tiene una bondad de ajuste más baja que los otros se puede concluir que las variables utilizadas para evaluar actualmente a los conductores en su respectivo programa de gestión estiman en menor medida el Consumo de combustible de la flota, por lo tanto es necesario complementar los análisis realizados en el SGE con las variables significativas tomadas de la línea CAN Articulado BLK y línea CAN Padrón.

## **6.2 Recomendaciones**

Teniendo en cuenta que el sistema de gestión de la energía propuesto sigue un ciclo de mejora continua P-H-V-A, se recomienda para las futuras revisiones y replanteamiento de objetivos realizar un análisis más específico sobre comportamiento de las variables significativas en tramos de ruta que por sus características son diferentes a otros, por ejemplo el tramo que va de la estación Hospital hasta Palos verdes, el de Aranjuez hasta Berlín, y otros de la línea L2, de esta manera se puede proponer un tipo de conducción, logística y funcionamiento de componentes de acuerdo a cada tramo en particular y lograr más eficiencia en el consumo de combustible de los buses.

Implementar una pantalla en el tablero de instrumentos del conductor que muestre en tiempo real el Rendimiento instantáneo, de esta manera el conductor sabrá en todo momento como está consumiendo combustible su vehículo y puede tomar acciones permanentemente para mejorarlo si es del caso, de esta manera los conductores tendrían la posibilidad de adaptar su nuevo estilo de conducción eficiente y alinearse con las nuevas variables que se agregarían a sus indicadores de Conducción.

Finalmente, para futuras investigaciones relacionadas es posible que nuevas variables de los diferentes sistemas del bus sean incluidas y seguramente se obtengan mejores bondades de ajuste en los modelos de regresión lineal, esto haría que los sistemas de gestión sean más efectivos y se obtengan mayores ahorros de combustible.

# Anexos

## Anexo 1: Recapitulación de la literatura relacionada a los sistemas de transporte

Enfoque principal	Desempeño de flotas		
<b>Autores</b>	Hensher, David	Deng, Taotao & Nelson, John	Currie, Graham & Delbosc, Alexa
<b>Objetivo principal</b>	Reforzar el atractivo de los sistemas BRT sobre otras estrategias de inversión en transporte público.	Evaluar el desempeño e impactos de los sistemas BRT	Identificar factores que pueden mejorar el desempeño de los sistemas BRT
<b>Metodología</b>	Análisis de los datos.	Análisis de los datos.	Análisis de los datos.
<b>Resultados</b>	Exposición de las ventajas de los sistemas BRT	Se determina un 85% de satisfacción por los usuarios que utilizan BRT	La ocupación y la frecuencia en el servicio son algunos factores que aumentan el desempeño de las flotas BRT

Enfoque principal	Desempeño de flotas	
<b>Autores</b>	David A. Hensher; Zheng Li & Corinne Mulley	Krelling, Christian & Badami, Madhav
<b>Objetivo principal</b>	Identificar las características de los sistemas BRT que mejoran la preferencia por los usuarios	Evaluar el desempeño operativo y financiero antes y después de la implementación de buses GNV
<b>Metodología</b>	Modelos estadísticos.	Análisis de los datos.
<b>Resultados</b>	La distancia entre las estaciones y el cobro de tarifas previas al abordaje aumentan la preferencia, mientras que el número de líneas troncales y densidad de población aumentan la frecuencia de uso.	Motores GNV tienen menor eficiencia y mayores costos de mantenimiento, sin embargo la emisión de GEI se reduce significativamente. Son entonces necesarias ayudas gubernamentales para este tipo de buses se sostengan financieramente.

Enfoque principal	Emisión de gases de efecto invernadero			
<b>Autores</b>	Soylu, Seref	Sonntag, Darrell & Oliver Gao, H.	Alam, Ahsan & Hatzopoulou, Marianne	Henry Wohrnschimmela; Miriam Zuka; Gerardo Martínez-Villa; Julia Ceron; Beatriz Cárdenas; Leonora Rojas-Bracho & Adrián Fernández-Bremauntz
<b>Objetivo principal</b>	Evaluar los impactos de las condiciones de operación del motor en los GEI	Identificar la relación entre las PN de acuerdo con los parámetros de funcionamiento del tráfico	Simular las operaciones y la emisión de GEI mediante el uso de diferentes combustibles y condiciones de operación	Evaluar el impacto del sistema BRT en la exposición de los pasajeros a los GEI
<b>Metodología</b>	Diseño de experimentos.	Modelos estadísticos.	Modelos matemáticos.	Modelos estadísticos.
<b>Resultados</b>	Las aceleraciones del motor causan incrementos en el PN, pero en velocidades constantes se disminuyen.	La carga en el motor, la velocidad del motor, la temperatura de escape, la potencia específica del vehículo y la velocidad del vehículo son parámetros significativos en la generación de PN.	las combinaciones entre combustibles, equipos auxiliares y planificación de rutas tiene los siguientes impactos: TPS (Prioridad en las Señales de Tránsito)=14% TSP + GNV=23% Reubicación de las paradas=9% Carriles salto de tráfico=15%	El BRT disminuyó entre un 20% y 70% la exposición de CO, benceno y PM2.5 en los usuarios del sistema, aunque no se observaron reducciones significativas en la exposición de PM10.

Enfoque principal	Emisión de gases de efecto invernadero		
<b>Autores</b>	McKenzie, Elaine Croft & Durango-Cohen, Pablo	Hajbabaeei, Maryam; Karavalakis, Georgios; Johnson, Kent; Lee, Linda & Durbin, Thomas	Erin Cooper; Magdala Arioli; Aileen Carrigan & Luis Antonio Lindau
<b>Objetivo principal</b>	Evaluar los costos y emisiones de GEI asociadas a la fabricación y funcionamiento de los buses (ciclo de vida).	Determinar los impactos de diferentes composiciones en el GNV y diferentes tecnologías implementadas en buses sobre la emisión de GEI.	Evaluar las emisiones de los GEI mediante la combinación de diversos equipos de postratamiento y tipos de motores.
<b>Metodología</b>	Modelos estadísticos.	Diseño de experimentos.	Diseño de experimentos.
<b>Resultados</b>	Buses que funcionan con GNV (emisor de 807ton de CO2eq) e híbridos (754ton y 826ton de CO2eq para el híbrido diésel-eléctrico y HFC respectivamente) generan menores GEI que los motores convencionales diésel (979ton de CO2eq).	El GNV con bajo contenido de metano mostró mayor emisión de NOx y NMHC (non-methane hydrocarbon) y menor emisión de THC (total hydrocarbon), CH4, y formaldehídos, además de una mayor economía de combustible sobre una base volumétrica	Las emisiones más nocivas como el NOx y CO2 con respecto a las PM pueden ser reducidas para cumplir el rango de emisión Euro V mediante la combinación del combustible biodiésel B100 y el uso de elementos como el filtro de partículas (DPF) y un SCR, mientras que el rango Euro IV puede ser cumplido solo por la combinación de combustible GNV y el Catalizador de Tres Vías (3WC).

Enfoque principal	Impactos sobre el consumo de combustible		
<b>Autores</b>	Kenneth Holmberg; Peter Andersson; Nils-Olof Nylunda; Kari Mäkelä & Ali Erdemir	Davor B. Vujanovic; Radomir M. Mijailovic; Vladimir M. Momcilovic; & Vladimir D. Papic	Cogollo Flórez, J. M.; Salazar López, J. C. & Correa Espinal, A. A.
<b>Objetivo principal</b>	Reportar el consumo de combustible en los vehículos de carretera debido a la fricción en motores, transmisiones, neumáticos, equipos auxiliares, y los frenos.	Definir actividades en el transporte de carga por carretera actividades sobre logística que contribuyan a mejorar la eficiencia energética.	Evaluar algunos de los factores presentes en la conducción de vehículos de carga pesada que pueden incidir en el consumo de combustible, con el fin de identificarlos y definir posibles acciones de mejora que permitan obtener un ahorro considerable en dicho consumo.
<b>Metodología</b>	Análisis de datos.	Diseño de experimentos.	Diseño de experimentos.
<b>Resultados</b>	En los vehículos pesados el 33% de la energía del combustible se utiliza para superar la fricción en el motor, la transmisión, neumáticos, equipos auxiliares, y el frenado. Las pérdidas por fricción parasitarias, con la fricción de frenado excluidos, son el 26% de la energía del combustible. En total, 34% de la energía del combustible se utiliza para mover el vehículo.	El factor de carga influye de manera importante en el consumo de combustible. Esto es, entre mayor ocupación de los vehículos mayor es el rendimiento del combustible utilizado.	Las variables tiempo en mínima (o ralenti), tiempo en velocidad de cruce y tiempo en el último cambio representan el 74,02% de la variabilidad experimentada en el consumo de combustible, y pueden optimizarlo hasta un 22,5%.

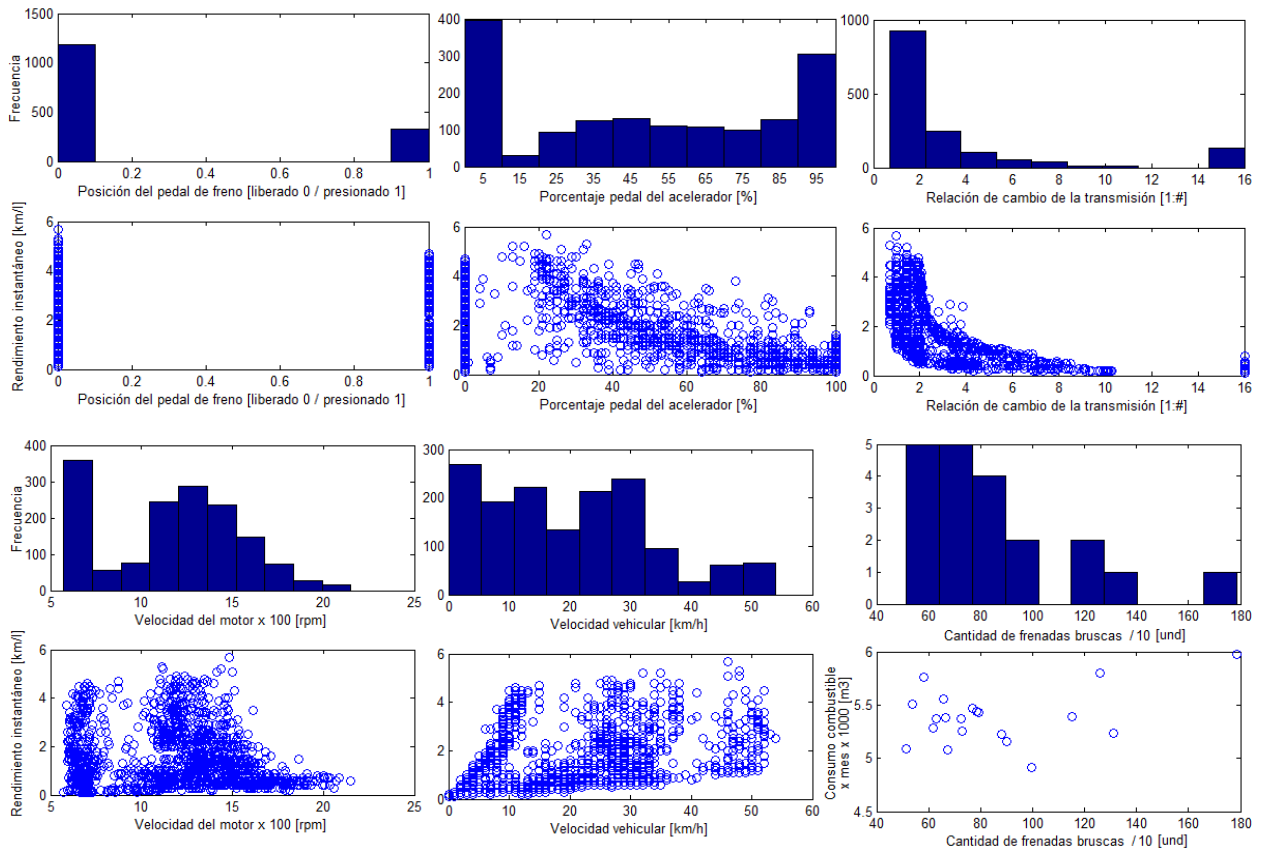
Enfoque principal	Impactos sobre el consumo de combustible		
<b>Autores</b>	Mohamed-Kassim, Zulfaa & Filippone, Antonio	Mahendra, Sadda & Rao, Amara Nageswara	De Lieto Vollaro, Roberto; Evangelisti, Luca; Battista, Gabriele; Gori, Paola; Guattari, Claudia & Fanchiotti, Aldo
<b>Objetivo principal</b>	Determinar potenciales ahorros en combustible mediante dispositivos para la reducción de la resistencia del aire en vehículos de carga.	Analizar el efecto de carga y la presión de los neumáticos sobre la resistencia a la rodadura, sus relaciones e influencia sobre el consumo de combustible.	Analizar y proponer acciones para optimizar la eficiencia energética desde la carrocería de los buses.
<b>Metodología</b>	Modelos matemáticos.	Modelos matemáticos.	Modelos matemáticos.
<b>Resultados</b>	Una reducción del 10% en el coeficiente de arrastre del camión de 40ton representó una reducción en el consumo de combustible del 1,5% en una ruta urbana, y un 3,8% para una ruta inter urbana, mientras que para un camión de 20ton, un 10% en la reducción del coeficiente de arrastre produjo una reducción en el consumo de combustible de 2,5% para una ruta urbana, y un 5,2% en una inter urbana.	La resistencia a la rodadura es proporcional a la carga, mientras que la relación entre la resistencia a la rodadura y la presión de los neumáticos es inversamente proporcional.	El 15,84% de la energía consumida por los sistemas de aire acondicionado puede ser reducida en los días de verano mediante el uso de vidrios con valor de transmitancia térmica igual a 0,98W/m <sup>2</sup> K y un factor solar g igual a 0,44, además de una pintura de alta reflectancia en el exterior que puede ser de color blanco.

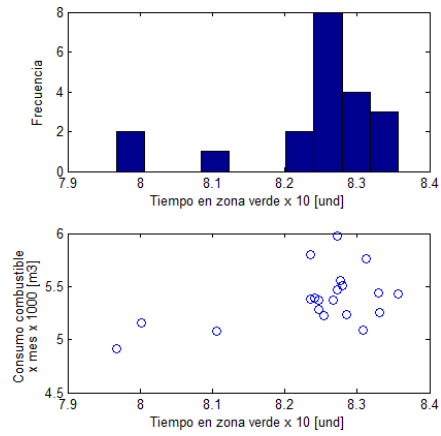


## Anexo 2: Parámetros descriptivos de las variables significativas para el consumo de combustible en Articulado.

**Tabla 2A:** Datos descriptivos de las variables de conducción para el bus Articulado.

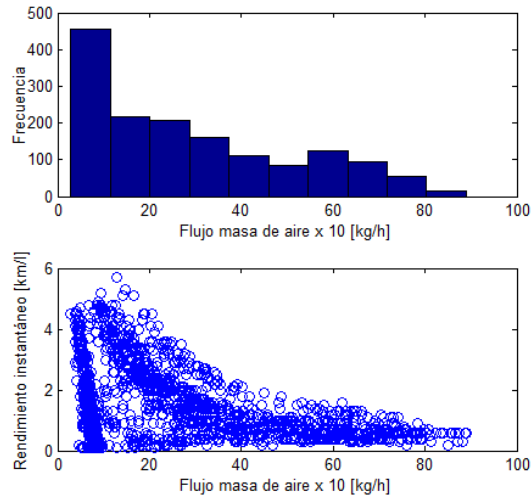
Variables		Cuartil Q1 (25%)	Mediana Q2 (50%)	Cuartil Q3 (75%)	Media	Desv. Estandar
X5	Posición del pedal de freno [lib. 0 / pres. 1]	0,00	0,00	0,00	0,22	0,41
X6	Porcentaje pedal del acelerador [%]	0,00	49,00	84,00	49,16	36,99
X7	Relación de cambio de la transmisión [1.:#]	1,43	1,93	3,52	3,67	4,14
X10	Velocidad del motor [rpm]	7,75	12,19	14,46	11,78	3,64
X12	Velocidad vehicular [km/h]	8,00	19,00	29,00	20,22	13,75
X3'	Cantidad frenadas bruscas / 10 [und]	64,40	75,00	95,00	84,82	31,65
X8'	Tiempo en zona verde x 10 [h]	8,24	8,27	8,30	8,24	0,10





**Tabla 2B:** Datos descriptivos de las variables de funcionamiento para el bus Articulado.

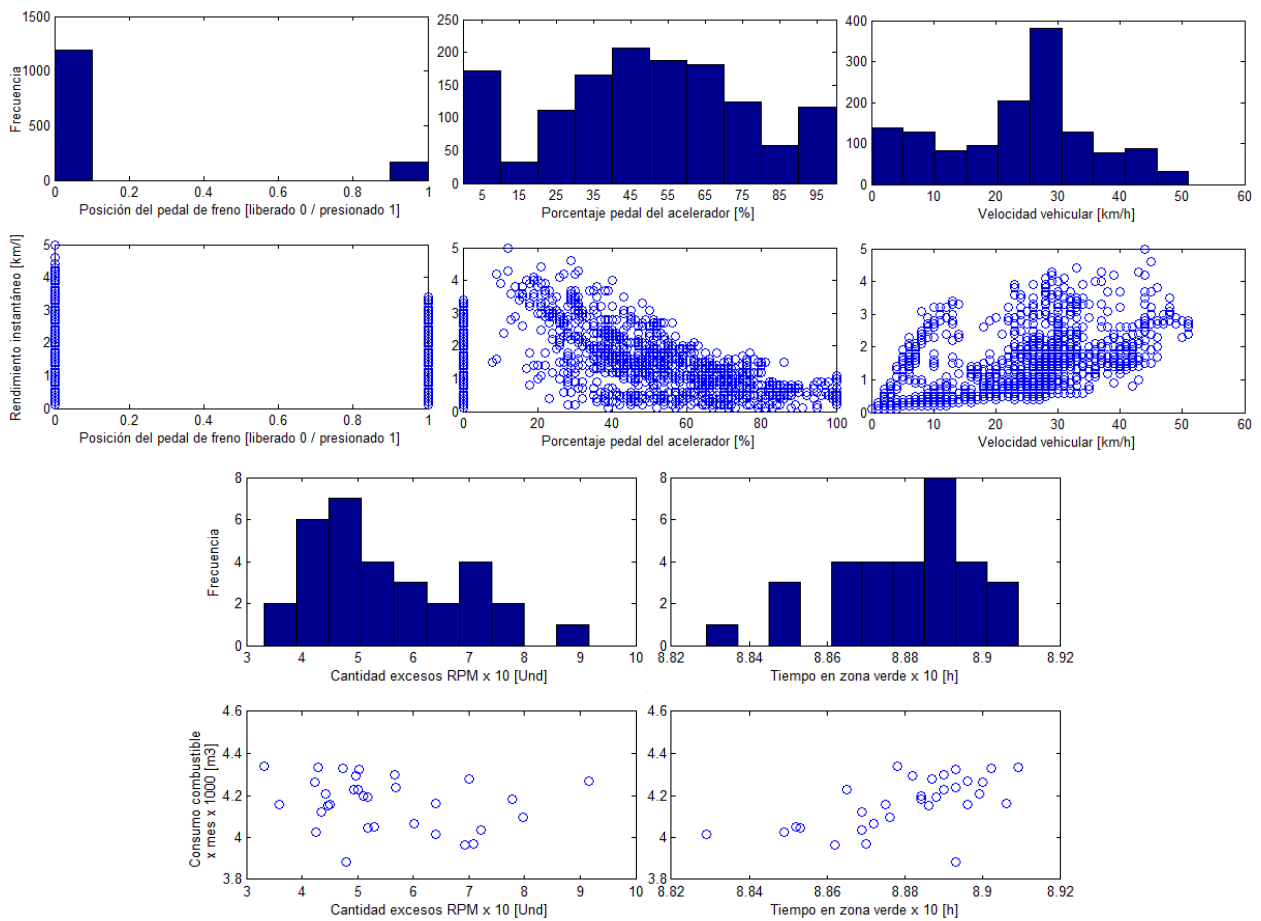
Variables	Cuartil Q1 (25%)	Mediana Q2 (50%)	Cuartil Q3 (75%)	Media	Desv. Estandar
X4   Flujo masa de aire x 10 [°C]	8,68	23,60	45,00	29,51	22,05



## Anexo 3: Parámetros descriptivos de las variables significativas para el consumo de combustible en Padrón.

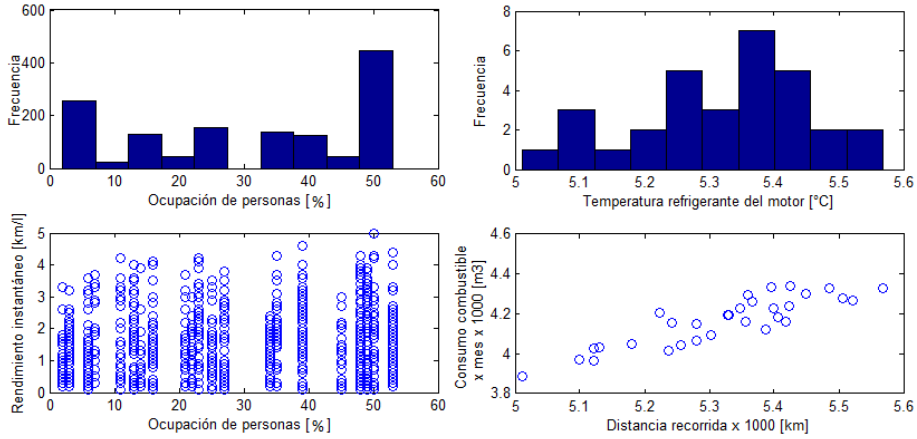
**Tabla 3A:** Datos descriptivos de las variables de conducción para el bus Padrón.

Variables		Cuartil Q1 (25%)	Mediana Q2 (50%)	Cuartil Q3 (75%)	Media	Desv. Estandar
X5	Posición del pedal de freno [lib. 0 / pres. 1]	0,00	0,00	0,00	0,12	0,32
X6	Porcentaje pedal del acelerador [%]	31,00	50,00	68,00	49,31	27,88
X12	Velocidad vehicular [km/h]	15,00	26,00	30,00	23,66	6,95
X2'	Cantidad excesos RPM x 10 [Und]	4,48	5,10	6,41	5,51	1,37
X8'	Tiempo en zona verde x 10 [h]	8,87	8,88	8,89	8,88	0,02



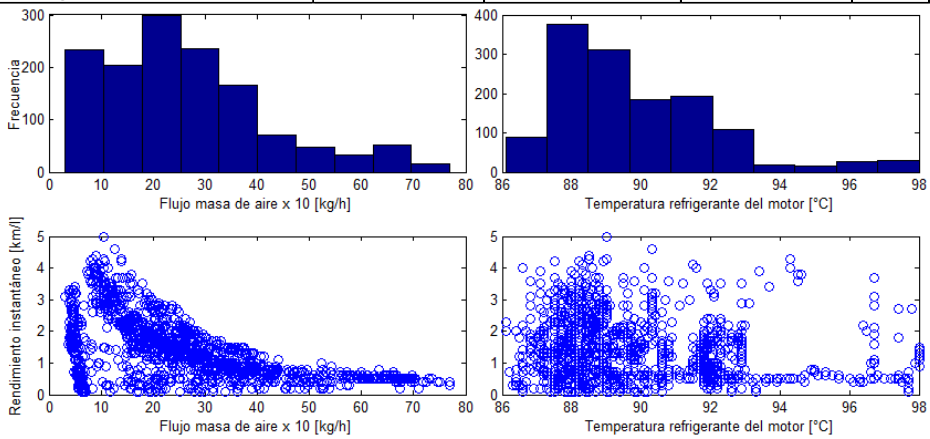
**Tabla 3B:** Datos descriptivos de las variables de logística para el bus Padrón.

Variables		Cuartil Q1 (25%)	Mediana Q2 (50%)	Cuartil Q3 (75%)	Media	Desv. Estandar
X13	Occupación de personas [%]	14,00	34,00	48,00	30,99	17,73
X6'	Distancia recorrida x 1000 [km]	5,24	5,35	5,42	5,32	0,14



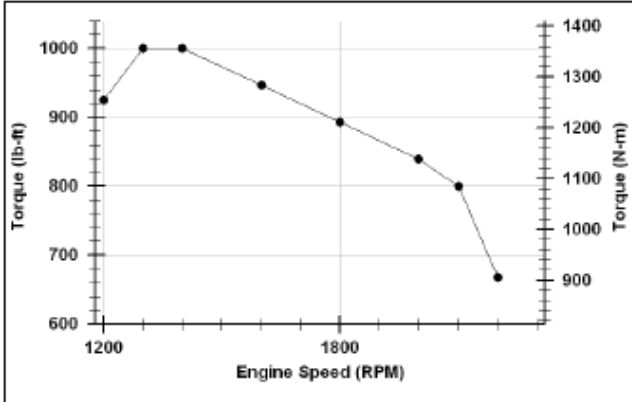
**Tabla 3C:** Datos descriptivos de las variables de funcionamiento para el bus Padrón.

Variables		Cuartil Q1 (25%)	Mediana Q2 (50%)	Cuartil Q3 (75%)	Media	Desv. Estandar
X4	Flujo masa de aire x 10 [kg/h]	14,94	23,66	34,64	26,22	16,12
X9	Temperatura refrigerante del motor [°C]	88,10	89,00	91,70	89,87	0,94

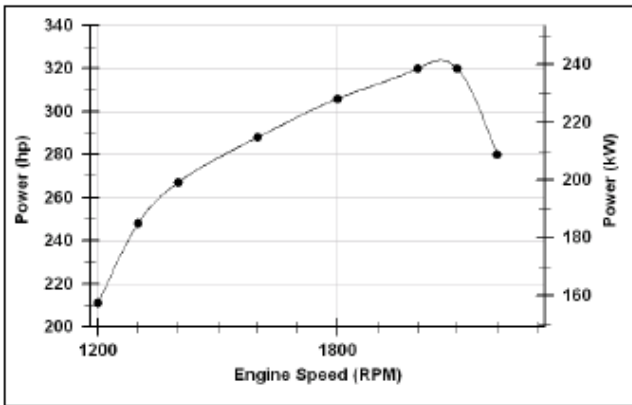


# Anexo 4: Curvas de desempeño para los motores ISLG 320HP, ISLG 280HP y GL11K 340HP.

Tabla 4A: Curvas de desempeño para el motor Cummins ISLG 320HP.

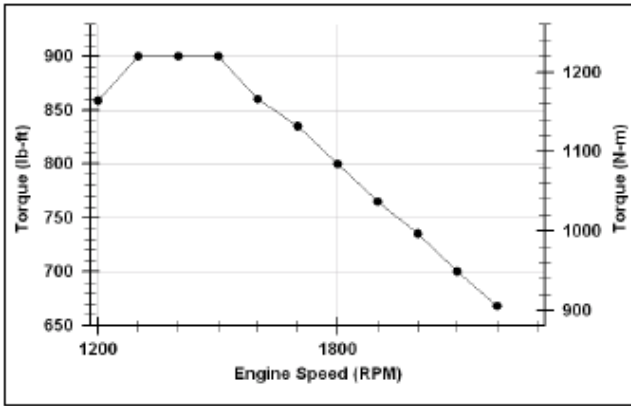


Torque Output		
RPM	lb-ft	N-m
1,200	925	1,254
1,300	1,000	1,356
1,400	1,000	1,356
1,600	947	1,284
1,800	893	1,211
2,000	840	1,139
2,100	800	1,085
2,200	668	906

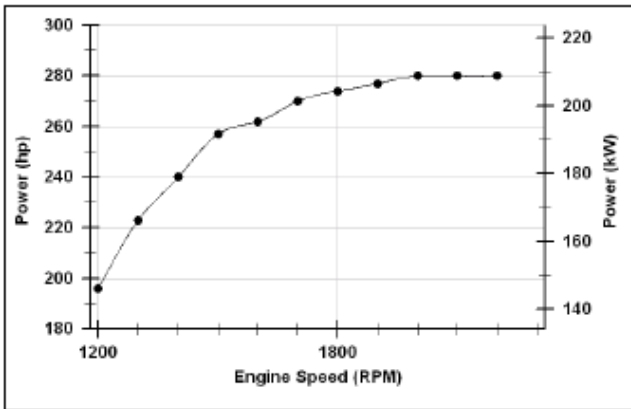


Power Output		
RPM	hp	kW
1,200	211	157
1,300	248	185
1,400	267	199
1,600	288	215
1,800	306	228
2,000	320	239
2,100	320	239
2,200	280	209

**Tabla 4B:** Curvas de desempeño para el motor Cummins ISLG 280HP.

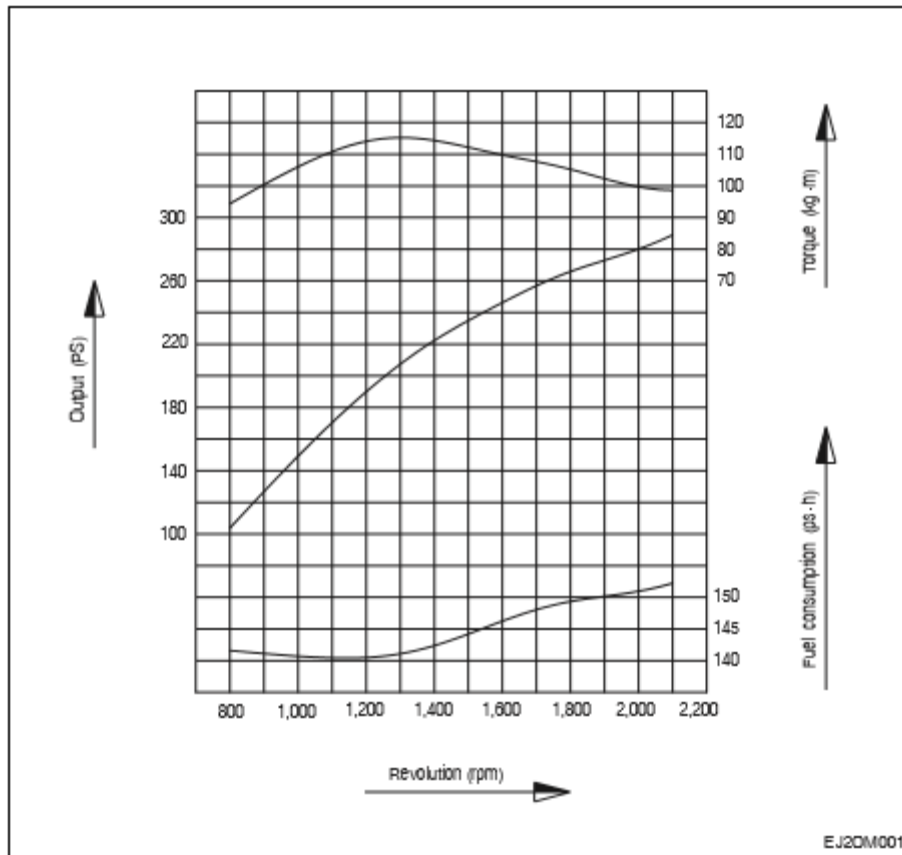


Torque Output		
RPM	lb-ft	N-m
1,200	859	1,165
1,300	900	1,220
1,400	900	1,220
1,500	900	1,220
1,600	860	1,166
1,700	835	1,132
1,800	800	1,085
1,900	765	1,037
2,000	735	997
2,100	700	949
2,200	668	906



Power Output		
RPM	hp	kW
1,200	196	146
1,300	223	166
1,400	240	179
1,500	257	192
1,600	262	195
1,700	270	201
1,800	274	204
1,900	277	207
2,000	280	209
2,100	280	209
2,200	280	209

**Tabla 4C:** Curvas de desempeño para el motor Doosan GL11K 340HP.



Performance		ISO 1585 (SAE – J1349)
Output	(max.)	340 ps / 2,100 rpm
Torque	(max.)	115 kg·m / 1,300 rpm
Fuel consumption	(min.)	140 g / ps·h

## Bibliografía

- Alam, A., & Hatzopoulou, M. (2014). Reducing transit bus emissions: Alternative fuels or traffic operations? *Atmospheric Environment*, 89, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.02.043>
- Bailla, A., & Grané, A. (2008). *100 Problemas resueltos de Estadística Multivariante (Implementados en Matlab)*. (F. García, Ed.). Madrid: Delta.
- Botero, C. G., Anzola, C. O., Martínez, W., & Rodríguez, R. (2015). Proyección de demanda de combustibles en el sector transporte en Colombia. *Unidad de Planeación Minero Energética, UPME*.
- Brain Trust Consulting Services. (2009). *Técnicas para la optimización de rutas de transporte y distribución*.
- Cobos, M. (n.d.-a). *CAP 1-Gestión eficiente del combustible en flotas de vehículos con rutas fijas*.
- Cobos, M. (n.d.-b). *CAP 2-Gestión eficiente del combustible en flotas de vehículos con rutas fijas*.
- Contraloría general de la República. (2010). *Sistemas integrados de transporte masivo en Colombia: avances, retos y perspectivas en el marco de la política nacional de transporte urbano*.
- Cooper, E., Arioli, M., Carrigan, A., & Lindau, L. A. (2014). Exhaust emissions of transit buses: Brazil and India case studies. *Research in Transportation Economics*, 48, 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.059>
- Correa Espinal, A. A., Cogollo Flórez, J. M., & Salazar López, J. C. (2010). Evaluación del efecto de la conducción eficiente en el consumo de combustible en vehículos de transporte de carga pesada usando diseño de experimentos. *Producción + Limpia*, 5, 95–112.
- cumminswestport.com. (2015). Retrieved February 17, 2016, from <http://www.cumminswestport.com/>
- Currie, G., & Delbosc, A. (2014). *Assessing Bus Rapid Transit system performance in Australia*.



- Research in Transportation Economics*, 48, 142–151.  
<https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.012>
- De Laire, M. (2013). Guía de Implementación de sistemas de gestión de la energía basada en ISO 50.001, *III*, 87–89. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- De Lieto Vollaro, R., Evangelisti, L., Battista, G., Gori, P., Guattari, C., & Fanchiotti, A. (2014). Bus for urban public transport: Energy performance optimization. *Energy Procedia*, 45, 731–738. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.078>
- Del Pilar, R., González, A., & Quispe, E. (2013). Mejoramiento de la eficiencia energética en la industria del cemento por proceso húmedo a través de la implementación del sistema de gestión integral de la energía. *Revista DYNA*, 115–123.
- Deng, T., & Nelson, J. D. (2013). Bus Rapid Transit implementation in Beijing: An evaluation of performance and impacts. *Research in Transportation Economics*, 39(1), 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.06.002>
- Figueroa, E. (2008). Curso gestión de la energía.
- García Garrido, S. (2009). Manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento industrial. In 2009 (pp. 1–4). Retrieved from <http://www.renovetec.com/ingenieria-del-mantenimiento.pdf>
- Gonzalez, U. (2012). *Principales consideraciones técnicas a tener en cuenta cuando se pretende usar buses a gas natural comprimido en ciudades en vía de desarrollo*. Clean Air Institute.
- Gulf. (n.d.). [gulfcolombia.com](http://gulfcolombia.com). Retrieved May 8, 2016, from <http://gulfcolombia.com/co/>
- Hajbabaie, M., Karavalakis, G., Johnson, K. C., Lee, L., & Durbin, T. D. (2013). Impact of natural gas fuel composition on criteria, toxic, and particle emissions from transit buses equipped with lean burn and stoichiometric engines. *Energy*, 62, 425–434. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.040>
- Hensher, D. A. (2007). Sustainable public transport systems: Moving towards a value for money and network-based approach and away from blind commitment. *Transport Policy*, 14(1), 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.10.004>
- Hensher, D. A., Li, Z., & Mulley, C. (2014). Drivers of bus rapid transit systems - Influences on patronage and service frequency. *Research in Transportation Economics*, 48, 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.038>
- Hernandez, A. (1996). Los sistemas de información: evolución y desarrollo. *Dialnet*, 14.
- Holmberg, K., Andersson, P., & Erdemir, A. (2012). Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology International*, 47, 221–234.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.11.022>

IDAE, I. para la D. y A. de la E. (2006). *Guía para la gestión del combustible en las flotas de transporte*.

IDAE, I. para la D. y A. de la E. (2011). *Conducción eficiente de vehículos industriales*.

Iglesias, A. (CITET). (2006). Jornada de gestión de flotas, 103. Retrieved from <http://www.citet.es/>

ISO - International Organization for Standardization. (2015). Retrieved December 18, 2015, from <http://www.iso.org/iso/home.html>

ITDP (Institute for Transportation & Development). (2010). Guía de Planificación de Sistemas BRT. Retrieved from <http://www.itdp.org/microsites/bus-rapid-transit-planning-guide/guia-de-planificacion-de-sistemas-brt-spanish/>

Jimenez, D. (n.d.). Mantenimiento planificado y programado.

Krelling, C., & Badami, M. G. (2016). Operational and financial performance of Delhi's natural gas-fueled public bus transit fleet: A critical evaluation. *Transport Policy*, 47, 178–188. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.02.001>

lapflotas.com. (n.d.). Retrieved May 7, 2016, from <http://www.lapflotas.com/>

Ledoit, O., & Wolf, M. (2004). Honey, I Shrunk the Sample Covariance Matrix. *The Journal of Portfolio Management*, 30(4), 110–119. <https://doi.org/10.3905/jpm.2004.110>

Mahendra, S., & Rao, A. N. (2004). Effect of tyre overload and inflation pressure on rolling loss and fuel consumption of automobile and truck-bus tyres. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 11(October), 36–40.

Marcano, L., & Fermín, W. (2013). Comparación de métodos de detección de datos anómalos multivariantes mediante un estudio de simulación. *Saber*, 25, 192–201.

McKenzie, E. C., & Durango-Cohen, P. L. (2012). Environmental life-cycle assessment of transit buses with alternative fuel technology. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(1), 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.09.008>

Megabus. (n.d.). [megabus.gov.co](http://www.megabus.gov.co). Retrieved April 24, 2016, from <http://www.megabus.gov.co/>

Mesa, Grajales, D. H., Ortiz, Sánchez, Y., & Pinzón, M. (2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia Et Technica*, XII(30), 155–160.

metrodemedellin.gov.co. (n.d.). Metro de Medellín. Retrieved May 3, 2016, from <https://www.metrodemedellin.gov.co/>

Metrolinea. (n.d.). [metrolinea.gov.co](http://www.metrolinea.gov.co). Retrieved April 23, 2016, from <http://www.metrolinea.gov.co/v2.0/index.php?cdrt=cGFnaW5hPWluaWNpbyZpZHBhZ2luY>

T0xJnByZWNIZGU9SW5pY2lv

- Mio. (n.d.). mio.com.co. Retrieved April 24, 2016, from <http://www.mio.com.co/index.php/es/>
- Mohamed-Kassim, Z., & Filippone, A. (2010). Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(5), 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.02.010>
- Muñoz, E. (1998). La técnica de análisis Discriminante: Una aplicación para el área bancaria. *Una Aplicación Para El Área Bancaria*.
- Pardo, C. F. (2009). Los cambios en los sistemas integrados de transporte masivo en las principales ciudades de América Latina. Retrieved July 26, 2012, from *Cepal Publicaciones* .... Retrieved from <http://200.9.3.98/publicaciones/xml/1/35361/lcw229e.pdf>
- Peirano, M. D. L. (2012). Sistemas de gestión de la energía.
- Peña, D. (2002). *Análisis de datos multivariantes*. <https://doi.org/8448136101>
- Peña, D., & Prieto, F. (2001). Multivariate Outlier Detection and Robust Covariance Matrix Estimation. *Technometrics*, 43(3), 286–310. <https://doi.org/10.1198/004017001316975899>
- qsrt.cumandes.com. (n.d.). Retrieved May 7, 2016, from <http://qsrt.cumandes.com/>
- Shaheen, S. A., & Lipman, T. E. (2007). Reducing greenhouse emissions and fuel consumption- Sustainable Approaches for Surface Transportation. *IATSS Research*, 31(1), 6–20. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60179-5](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60179-5)
- Sonntag, D. B., & Oliver Gao, H. (2009). Developing link-based particle number emission models for diesel transit buses using engine and vehicle parameters. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(4), 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.01.009>
- Soylu, S. (2015). Development of PN emission factors for the real world urban driving conditions of a hybrid city bus. *Applied Energy*, 138, 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.001>
- THINK&SELL. (n.d.). Sistemas de Gestión Normalizados | THINK&SELL. Retrieved February 12, 2016, from <http://thinkandsell.com/servicios/consultoria/software-y-sistemas/sistemas-de-gestion-normalizados/>
- Transmetro. (n.d.). transmetro.gov.co. Retrieved April 24, 2016, from <http://www.transmetro.gov.co/>
- Villalobos, J. (2010). Eficiencia energética en el transporte de carga por carretera. *CEPAL*, (1), 1–8.
- Vujanovic, D., Mijailovic, R., Momcilovic, V., & Papic, V. (2010). Energy efficiency as a criterion in the vehicle fleet management process. *Thermal Science*, 14(4), 865–878.

<https://doi.org/10.2298/TSCI090719010V>

- Wöhrensimmel, H., Zuk, M., Martínez-Villa, G., Cerón, J., Cárdenas, B., Rojas-Bracho, L., & Fernández-Bremauntz, A. (2008). The impact of a Bus Rapid Transit system on commuters' exposure to Benzene, CO, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 42(35), 8194–8203. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.062>
- Yepes, T. (2013). La integración de los sistemas de transporte urbano en Colombia, 107. Retrieved from <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/La-integración-de-los-sistemas-de-transporte-urbano-en-Colombia-Findeter.pdf>

