

Formulación de una estrategia para revertir la tendencia decreciente del consumo de gas natural comprimido para uso vehicular en Colombia



Trabajo de grado para optar por título de Magíster en Gerencia de Ingeniería

Dirigido por:
MARÍA FERNANDA GÓMEZ GALINDO, PhD

Nelson Fabián Molina Molina
Agosto 2020

Universidad De La Sabana
Facultad de Ingeniería
Maestría en Gerencia de Ingeniería

RESUMEN

El consumo de gas natural comprimido para uso vehicular en Colombia (GNCV) ha mostrado una tendencia decreciente en los últimos años a pesar de los beneficios ambientales y económicos que ofrece. Desde que se empezó su uso en Colombia, esta tendencia ha presentado más caídas que picos de alza. Se pretende con este análisis dar respuesta a la pregunta de investigación: *¿Cómo seleccionar una estrategia que permita revertir la tendencia de decrecimiento del consumo de GNCV en Colombia?*

Para proponer una estrategia orientada al incremento del consumo de Gas Natural Comprimido para uso Vehicular en Colombia, se plantea una metodología integrada que toma en cuenta los factores que inciden en la industria del gas natural y las perspectivas de las partes involucradas, para seleccionar la estrategia más apropiada y revisar su impacto en la implementación. La metodología integra análisis DOFA, análisis Multicriterio, Programación por Objetivos y Matriz de Cambio.

Mientras que el *análisis DOFA* facilita el estudio de los factores que inciden en la industria para la formulación de las posibles estrategias, el *análisis multicriterio* considera la posición de las partes involucradas para la selección de la estrategia más apropiada por medio de la priorización de estrategias con la participación de un panel de expertos – *stakeholders* (ver anexo C), la *programación por objetivos* permite priorizar estas estrategias, considerando las desviaciones en el proceso de toma de decisiones y finalmente la *matriz de cambio* define el impacto potencial de la implementación de la estrategia planteada.

El análisis de resultados indica que una estrategia que considere *crear estímulos que incrementen el parque automotor de vehículos que usan GNCV, y renovarlo, con mayores*

conversiones de vehículos livianos y con vehículos de carga dedicados, es la más apropiada para el entorno colombiano.

La estrategia seleccionada y las suplementarias que le sirven de apoyo, requieren para su implementación acciones específicas:

1. Es importante que las conversiones de los vehículos a GNCV se hagan bajo especificaciones técnicas que aseguren su calidad. Una de las causas de la caída del consumo identificadas en este estudio, es la falta de seguimiento a las normas técnicas que regulan la materia, lo que se ha traducido en desconfianza de los usuarios para usar y mantener el consumo de GNCV. En consecuencia, es necesario aprovechar la normatividad ya establecida y asegurar su cumplimiento.
2. Es necesario el diseño de políticas públicas que consideren instrumentos como descuentos en impuestos, facilidades de parqueo en sitios públicos, precios especiales en revisión técnico-mecánica, directrices para el transporte de carga con exigencias en materia ambiental, entre otros. Es decir, los estímulos comerciales que surgen como iniciativa de los privados, deben complementarse con las políticas públicas especiales para los vehículos que funcionen a GNCV.
3. Es necesario garantizar el abastecimiento de GNL en el largo plazo para asegurar la disponibilidad de gas natural en el mercado interno, teniendo en consideración las pocas reservas con que cuenta el país. Este es un aspecto importante para dar confiabilidad a los usuarios sobre la sostenibilidad del uso de GNCV, porque se pueden crear todos los estímulos y se usa masivamente la tecnología, pero los usuarios deben ver y saber que su inversión va a perdurar por varios años, y si no hay seguridad de suministro la estrategia no funcionará.

Palabras clave: Gas Natural Comprimido para uso Vehicular, análisis DOFA, análisis multicriterio, programación por objetivos – *goal programming*, estrategia, Matriz de Cambio.

Abreviaturas

GNCV: Gas Natural Comprimido para Uso Vehicular

MPCD: Millones de Pies Cúbicos Diarios

GBTUD: Giga BTU Diarios

GPC: Giga Pies Cúbicos

COP 21: Conference Of Paris number 21 (Conferencia de París No. 21)

GNL: Gas Natural Licuado

UPME: Unidad de Planeación Minero Energética

PM: Material Particulado

VUCE: Ventanilla Única de Comercio Exterior

CONTENIDO

RESUMEN	2
Abreviaturas	4
CONTENIDO	5
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	8
INTRODUCCIÓN	9
1. CONTEXTO SECTOR TRANSPORTE.....	17
2. MARCO CONCEPTUAL	21
2.1. CONCEPTOS TÉCNICOS	21
2.1.1. El Gas natural	21
2.1.1.1 Ventajas.....	22
2.1.1.2 Desventajas.....	25
2.1.2. Gas Natural Comprimido para uso Vehicular – GNCV	26
2.1.3. El Gas Natural Licuado – GNL	28
2.1.4. Conversión a gas natural vehicular.....	28
2.1.4.1 Tendencia de la conversión de vehículos	29
2.1.4.2 Ahorros en combustible con el consumo de GNCV	30
2.2. CONCEPTOS PARA DESARROLLO METODOLÓGICO	32
2.2.1. ANÁLISIS DOFA	34
2.2.2. Análisis Multicriterio.....	36
2.2.3. Programación por objetivos – <i>Goal Programming</i>	38
2.2.3.1 Números difusos (fuzzy numbers)	39
2.2.3.2 Centro de Gravedad (CoG).	40
2.2.4. Matriz de Cambio	40
3. METODOLOGÍA.....	42
3.1. Etapa 1: Análisis DOFA.....	44
3.1.1. Formulación de estrategias en el análisis DOFA.....	45
3.2. Etapa 2: Análisis Multi-Criterio (Multi-Criteria Decision Making – MCDM) para formulación de estrategias.....	46
3.3. Etapa 3: Priorización de estrategias. Programación por objetivos – Goal Programming (GP)	47
3.4. Etapa 4: Matriz de Cambio.....	49
4. RESULTADOS.....	51

4.1. Etapa 1: Análisis DOFA.....	51
4.1.1. Matriz DOFA.....	51
4.1.1.1 Fortalezas	51
4.1.1.2 Oportunidades	58
4.1.1.3 Debilidades.....	66
4.1.1.4 Amenazas	74
4.1.2. Estrategias DOFA.....	81
4.2. Etapa 2: ANÁLISIS MULTICRITERIO	91
4.2.1. Calificación conceptual	93
4.2.2. Matriz MCDM.....	94
4.2.3. Etapa 3: Priorización de estrategias. Programación por objetivos.	97
4.2.4. Estrategia Seleccionada	100
5. IMPACTO DE IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIA SELECCIONADA.....	104
5.1. Matriz de Cambio.....	104
5.1.1. Realidad actual	105
5.1.2. Realidad objetivo.....	105
5.1.3. Matriz de Transición.....	106
5.1.4. Análisis	107
5.1.5. Evaluación de las partes interesadas.....	111
5.2. Cuantificación del Impacto	112
CONCLUSIONES	120
BIBLIOGRAFÍA	124
ANEXOS	132
A. TENDENCIAS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLES Y CRECIMIENTO DE PARQUE AUTOMOTOR.....	132
B. ENCUESTA STAKEHOLDERS – EVALUACIÓN GNCV	134
C. PERFILES DE EXPERTOS CONSULTADOS.....	137
D. CÓDIGO GUROBI.....	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparativo del parque automotor en Colombia	17
Figura 2. Tendencia de vehículos convertidos (valor acumulado) y consumo de GNCV.....	19
Figura 3. Esquema de funcionamiento de una estación de servicio que suministra GNCV.....	27
Figura 4. Acumulado de vehículos convertidos en Colombia	30
Figura 5. Esquema básico del proceso de toma de decisiones.....	37
Figura 6. Esquema de una Matriz de Cambio.....	41
Figura 7. Esquema del desarrollo metodológico.....	42
Figura 8. Matriz de estrategias DOFA	45
Figura 9. Matriz DOFA GNCV en Colombia.....	51
Figura 10. Mapa de la red de gas en Colombia.....	53
Figura 11. Infografía de los pozos Gorgon-1, Kronos-1 y Purple Angel-1	60
Figura 12. Tendencia de los precios de los combustibles en Colombia durante el año 2018.....	69
Figura 13. Producción de Gas Natural en Colombia	76
Figura 14. Matriz de Cambio	107
Figura 15. Comparativo de consumo de vehículos a GNCV	117
Figura 16. Tendencia de consumo final de gasolina – sector transporte	132
Figura 17. Tendencia de consumo final de diésel – sector transporte	132
Figura 18. Tendencia de consumo final de gas natural – sector transporte	133
Figura 19. Crecimiento parque automotor – automóviles de servicio público	133

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sistematización de la revisión bibliográfica	14
Tabla 2. Comparativo de capacidad de almacenamiento.....	18
Tabla 3. Inventario de emisiones del sector transporte.....	19
Tabla 4. Emisiones promedio de viaje por milla	25
Tabla 5. Cálculo convencional del ahorro por consumo de GNCV con respecto al consumo de gasolina	31
Tabla 6. Principales transportadoras de gas de Colombia	52
Tabla 7. Expertos consultados	92
Tabla 8. Variables y calificaciones sugeridas	94
Tabla 9. Matriz MCDM	94
Tabla 10. Asignación numérica de las calificaciones	95
Tabla 11. Nueva matriz MCDM	95
Tabla 12. Calificación para los pesos de los criterios DOFA	96
Tabla 13. Normalización de los pesos de los criterios DOFA	97
Tabla 14. Ranking de las estrategias.....	99
Tabla 15. Cálculo estimado del impacto sobre un taller de conversión.....	116
Tabla 16. Tabla de Índice de Calidad del Aire – ICA	118

INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales que están afectando el planeta, en cuanto los gases efecto invernadero, han promovido el uso de energías limpias, en línea con lo definido en la Convención Marco sobre el Cambio Climático de 2015 – COP21, según la cual el cambio climático representa una amenaza apremiante y con efectos potencialmente irreversibles para la población. Por lo tanto, se hace necesaria la cooperación de todos los países y su participación en una respuesta internacional efectiva y apropiada, con miras a acelerar la reducción de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

Colombia se comprometió a tomar acciones nacionales de cara a la COP21 y a abordar la problemática del cambio climático de la forma más balanceada posible, incluyendo la mitigación, la adaptación y los medios de implementación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Una de tales acciones podría ser el incremento del consumo de gas natural como combustible vehicular. El uso de este combustible se ha masificado en diferentes sectores de la industria en Colombia, incluyendo el sector transporte, con resultados benéficos para el país y para los consumidores en materia de reducción de costos y de emisiones contaminantes.

El Gas Natural Comprimido para uso Vehicular – GNCV es amigable con el medio ambiente, emite menos cantidad de gases efecto invernadero que la gasolina o diésel, y menos material particulado que afecta la calidad del aire, pero a nivel mecánico permanece la duda acerca de sus efectos sobre los motores. En cuanto a costos de consumo, como se señala en la sección 2.1.4.2, se muestra que es más rentable el GNCV dado su rendimiento respecto a los otros combustibles. Estos son algunos de los factores a analizar para determinar el costo-beneficio del uso de gas natural vehicular y entender el comportamiento del mercado en el país.

En Colombia hace más de 20 años se empezó a usar el gas natural como combustible vehicular, muchos automóviles se convirtieron para funcionar de manera dual (con gas o gasolina) y el auge de esta alternativa tomaba fuerza y parecía una mejor opción respecto de los combustibles tradicionales (gasolina y diésel). Sin embargo, la tendencia del consumo del GNCV ha sido desfavorable, lo cual es difícil de explicar si se tienen en cuenta los beneficios a nivel económico y ambiental que brinda. Adicionalmente, el decrecimiento de su consumo en la última década contrasta con el crecimiento del parque automotor y del consumo de gasolina y diésel (ver Anexo A). En este estudio, se parte de la hipótesis de que hay deficiencias técnicas, económicas, regulatorias, políticas o gubernamentales que podrían estar afectando negativamente el crecimiento del mercado.

Remitiendo a la historia en Colombia, desde el año 2003 se incentivó desde el Gobierno Nacional el uso del GNCV, tomando como consideración los descubrimientos de nuevos yacimientos, los beneficios ambientales y económicos que ofrece este combustible (Departamento Nacional de Planeación, 2003).

También surgieron las regulaciones correspondientes para controlar el uso legal, adecuado y seguro de esta clase de combustible, y se crearon los reglamentos técnicos para las estaciones de servicio que suministran gas natural comprimido para uso vehicular, los cuales fueron compilados en la Resolución No 40278 de 2017, expedida por el Ministerio de Minas y Energía, y para los talleres que hacen las conversiones de vehículos a gas natural en la Resolución No 0957 de 2012, expedida por el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.

Sin embargo, el consumo del gas natural en vehículos no ha tenido un crecimiento acorde a sus beneficios y por el contrario, se ha presentado un decrecimiento de la demanda en los últimos años, como se ha podido confirmar a través de aproximaciones personales en los talleres de

conversión de vehículos y estaciones de suministro de GNCV, donde se presenta la queja generalizada de que el mercado ya no es tan bueno, que casi no se hacen conversiones y que la venta de gas no es rentable.

Igualmente, es importante contemplar la perspectiva ambiental. Las emisiones de gases efecto invernadero, tales como CO₂, NO_x, CH₄ producidas por el GNCV son menores a las de los combustibles fósiles. Adicionalmente, el gas natural emite material particulado en un nivel significativamente inferior al aquel emitido por otro tipo de combustibles como el diésel.

En cuanto a aspectos mecánicos y quizás en concordancia con el bajo consumo de GNCV expuesto, algunos sectores argumentan desventajas del combustible en términos del rendimiento, pérdida de potencia y posible deterioro del motor de los vehículos convertidos. Se ha señalado que la potencia de un motor convertido puede perder hasta un 20% usando gas natural comprimido respecto del uso con gasolina, debido a factores como la eficiencia térmica y las bajas cantidades de hidrocarburos (HCs) y monóxido de carbono (CO) que entrega el gas (Mello, Pelliza, & Catalun, 2006). Adicionalmente se debe considerar la calidad y adecuada instalación del equipo de conversión y el estado del vehículo al momento del montaje.

Al cuestionamiento planteado sobre el desempeño mecánico se suma un factor regulatorio que podría estar evitando el uso del GNCV. Se han establecido reglamentos técnicos, por parte de los Ministerios de Comercio, Industria y Turismo y de Minas y Energía, que deben cumplir los talleres de conversión de vehículos y las estaciones de suministro, debido a los riesgos inherentes al uso del gas natural comprimido, como accidentes o incidentes provocados por asfixia, explosiones e incendios, derivados de la operación de los talleres, equipos y procesos de conversión y de las estaciones de servicio; razón por la cual se hizo necesario proteger la vida y la salud humanas, y prevenir prácticas que puedan inducir a error a los usuarios, así como garantizar

el suministro seguro del combustible (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2012) (Ministerio de Minas y Energía, 2017).

De acuerdo con aproximaciones a propietarios, administradores y gerentes de talleres de conversión y estaciones de suministro de gas, encargados del área de gas vehicular de las empresas distribuidoras y usuarios, se tiene la percepción de que la regulación es exigente, debido a la cantidad de requisitos que hay y que llegan a redundar o son incoherentes entre sí mismos, a que la demostración de la conformidad requiere trámites adicionales sobre certificaciones con las que ya se cuentan y que pueden ser equivalentes para demostrar el cumplimiento, tales como las de fábrica en el caso de los equipos que se importan de otros países o competencias laborales para el caso de personal que cuenta con alguna calificación técnica para la industria del GNCV.

Dado lo anterior, también se genera la idea de que estos requisitos son difíciles de cumplir, y la existencia de requisitos redundantes repercute en inversiones adicionales, teniendo en cuenta los procesos para la adecuación y posterior certificación, costos que si bien hacen parte del mismo negocio, requiere de obtención y disponibilidad económica que no es compensada con la baja demanda de gas natural vehicular. Adicionalmente, estos procesos de certificaciones tienen falencias que acrecientan las dudas para el desarrollo de la industria y que aumentan la percepción de una exigencia mayor para obtener las certificaciones.

De esta manera, se puede advertir que pudiesen existir falencias en las regulaciones existentes. Un estudio de Concentra respalda esta idea, indicando que hay una presunta ausencia de respaldo legal, falta de apoyo y de lineamientos por parte del Estado, para que tenga un papel más activo en el desarrollo del mercado, y se incentive el uso del GNCV (Concentra - Inteligencia en Energía, 2018).

En Colombia tanto el sector público como el privado son conscientes de la necesidad de estimular el uso del gas natural para automotores y los particulares reclaman que desde el Gobierno Nacional se creen políticas más efectivas para incentivarlo, aunque el Gobierno reconoce que se tienen lineamientos en materia de movilidad que dificultan la entrada de esta energía alterna para el transporte (Revista Semana & Asociación Nacional de Gas Natural - Naturgas, 2017). Adicionalmente, Colombia tiene reservas limitadas de gas natural que ascienden a cerca de 0.11 MMm³ (Millones de metros cúbicos), que traducidos a tiempo, implican que aproximadamente a 2023 se podría presentar un déficit a nivel nacional según la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2015). Este es un factor a tener en cuenta para el análisis del futuro del GNCV en (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2007).

La pregunta de investigación alrededor de la cual se desarrolla este trabajo es *¿Cómo seleccionar una estrategia que permita revertir la tendencia de decrecimiento del consumo de GNCV en Colombia?*

Con el fin de proponer una estrategia orientada al incremento del consumo de Gas Natural Comprimido para uso Vehicular en Colombia, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Plantear posibles estrategias para revertir la tendencia decreciente del consumo de GNVC en Colombia a partir del diagnóstico DOFA.
2. Analizar la estrategia con mayor potencial a través de un análisis multicriterio y programación por objetivos – goal programming.
3. Evaluar el impacto de la estrategia seleccionada sobre el consumo nacional de GNCV utilizando una matriz de cambio.

Para el estudio, se partió de una revisión bibliográfica fundamental, que incluyó la búsqueda sistemática, organización y análisis de la documentación.

Se tomaron como referencia artículos técnicos y estudios de las tendencias de la industria del GNCV en el país, así como conclusiones de diferentes cumbres de expertos; lo que permitió obtener la mayor parte de información sobre fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas que puede tener la industria en Colombia. La búsqueda se sistematizó de la siguiente manera (ver Tabla 1).

Tabla 1. Sistematización de la revisión bibliográfica. Elaboración propia.

Tipo de información	Tipo de fuente	Resultado	
		# de fuentes	%
Conceptualización sobre análisis DOFA		7	8,6%
Conceptualización sobre análisis multicriterio	Artículos técnicos o científicos, Bases de datos, textos académicos, legislación actual, estudios del Gobierno	7	8,6%
Conceptualización sobre programación por objetivos		4	4,9%
Conceptualización técnica sobre GN – GNCV		9	11,1%
Aplicaciones metodológicas similares	Artículos técnicos o científicos	17	21,0%
Opiniones de expertos en GNCV	Artículos de actualidad, revistas, conclusiones de congresos y foros	5	6,2%
Percepciones sobre factores DOFA		18	22,2%
Solución a otras problemáticas similares	Artículos técnicos o científicos, Bases de datos	2	2,5%
Estado actual del problema	Artículos técnicos, científicos y de actualidad, revistas, conclusiones de congresos y foros, legislación actual, estudios del Gobierno	12	14,8%
Total		81	100%

La conceptualización sobre *análisis DOFA*, *multicriterio*, *programación por objetivos* y *GNCV*, se utilizó para la consolidación de información base referente a los temas y metodologías que se trataron. Se analizó información relacionada con casos y metodologías similares, que guiaron la solución que se requirió en este estudio. Finalmente se consideraron las percepciones de varios expertos participantes de la cadena del gas natural, como propietarios y gerentes de talleres de conversión y de estaciones de servicio, distribuidores, productores y consultores sobre

el estado actual del problema, su opinión sobre los criterios DOFA y posibles alternativas que pudieran revertir la tendencia decreciente del consumo de GNCV.

Para el desarrollo de este trabajo se requirió la ejecución de una serie de actividades distribuidas en tres etapas. La etapa 1 (formulación) requirió un análisis DOFA, a partir del cual se plantearon las estrategias básicas, que fueron valoradas y priorizadas en la etapa 2 (selección de estrategia) con la participación de un panel de expertos (ver Anexo C) a través de la realización de un análisis multicriterio combinado con un modelo de optimización por objetivos – *goal programming*. En la tercera etapa se evaluó y cuantificó el impacto que tendría la implementación de la estrategia seleccionada, a través de una matriz de cambio.

La aproximación integral de la metodología utilizada en este trabajo constituye una contribución importante del mismo. En la literatura se encontraron aplicaciones separadas de las metodologías mencionadas. Pocos autores han integrado el análisis DOFA con *Goal Programming* (Khan I. M., 2018); otros, han recurrido al uso de Analysis Hierarchy Process – AHP (Solangia, Tan, Mirjat, & Ali, 2019) (Kajanus, Leskinen, Kurttila, & Kangas, 2012) (Lee & Walsh, 2011), de ANP – *Analytic Network Process* y fuzzy TOPSIS – *fuzzy Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution* (Ervural B. , Zaim, Demirel, Aydin, & Delen, 2018). No se encontraron estudios que integraran las cuatro metodologías objeto del presente análisis.

El presente estudio está organizado de manera que en el primer capítulo se da un contexto del sector trasporte en Colombia. En el segundo capítulo se presentan los conceptos técnicos sobre el gas natural y sus diferentes procesos de obtención, producción y distribución hacia usuarios finales, así como los conceptos necesarios para comprender el desarrollo metodológico que se realizó. En el tercer capítulo se presenta la metodología que se empleó para dar solución al problema planteado y en un cuarto capítulo se consolidaron los resultados del análisis DOFA y

multicriterio surtidos durante el desarrollo metodológico, que permitió determinar cuál debería ser la estrategia a implementar. Finalmente, en el quinto capítulo se evaluó y cuantificó el impacto de la implementación de la estrategia establecida como solución al problema.

La investigación permitió entender el comportamiento de la industria del GNCV en Colombia y cómo, a partir del estímulo de su consumo, se deriva un beneficio para el ambiente, a partir del uso de energías más limpias y un menor deterioro de la salud y de la calidad de vida de las personas que se ven perjudicadas por la mala calidad del aire que ocasiona la emisión del material particulado emitido por los combustibles líquidos. Este análisis también es de interés para los actores principales del mercado, como los usuarios, talleres de conversión de vehículos, importadores de componentes para la conversión y estaciones de servicio para el suministro de gas natural. Este estudio concluye que una estrategia que considere *crear estímulos que incrementen el parque automotor de vehículos que usan este combustible, y renovarlo, con mayores conversiones de vehículos livianos y con vehículos de carga dedicados*, es la más apropiada para el entorno Colombiano, y que para su implementación se requiere del aporte, tanto del sector privado como del Gobierno Nacional. Las conclusiones de este trabajo constituyen un primer paso para la creación y el desarrollo de políticas públicas o regulaciones necesarias y obligatorias, que estimulen el uso del gas natural como una energía alternativa en usos vehiculares y que contribuyan para aumentar su consumo.

1. CONTEXTO SECTOR TRANSPORTE

Para empezar este estudio se hace una descripción del contexto del sector transporte en Colombia, el cual muestra que a 2018, en total circulaban más de 13.800.000 vehículos automotores terrestres, de los cuales, alrededor de 5.200.000 corresponden a vehículos livianos de pasajeros, como automóviles, camperos o camionetas, más de 194.000 corresponden a unidades de transporte masivo de pasajeros, como microbuses, busetas o buses y más de 370.000 vehículos de carga, como camiones, tractocamiones y volquetas. El restante de vehículos de este parque lo componen motocicletas, maquinaria, ciclomotores y otros (Ministerio de Transporte, 2019). De este parque automotor, hay casi 570.000 vehículos livianos de pasajeros convertidos a GNCV (ver Figura 1) (Concentra - Inteligencia en Energía, 2018), al final del año 2020 llegarán a haber más de 500 vehículos de transporte masivo, contando la nueva flota de buses de Transmilenio que entrará en operación a mediados del año (Transmilenio S.A., 2019) y más de 150 de tractocamiones dedicados¹ a gas natural (Promigas, 2018). En la Figura 1 se observa la porción de vehículos que funcionan a GNCV, comparativamente dentro del parque automotor de Colombia.

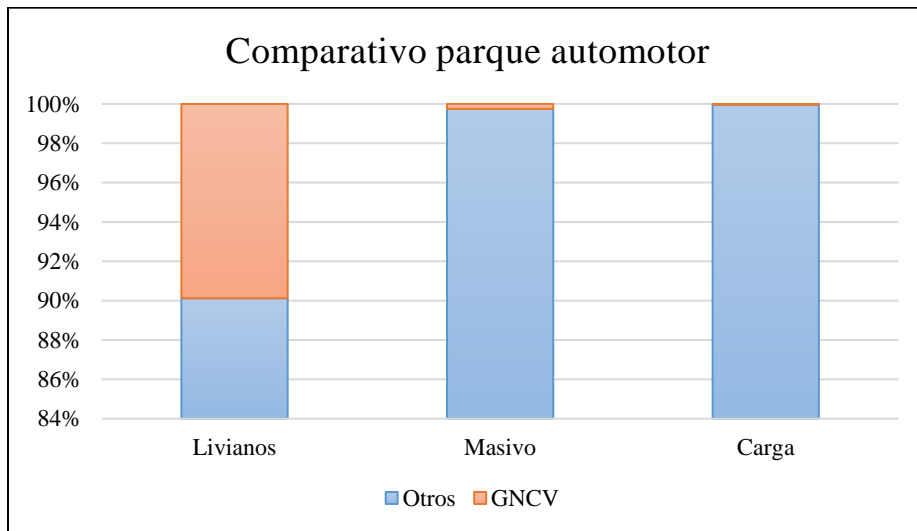


Figura 1. Comparativo del parque automotor en Colombia. Elaboración propia.

¹ Los vehículos dedicados son aquellos que funcionan únicamente con gas natural. (ICONTEC, 2018).

Lo anterior muestra que la mayor participación en los vehículos a GNCV ha estado en el parque automotor de automóviles livianos convertidos, con el 99,88% del total de automotores que funcionan con este combustible. En cuanto al análisis del consumo que pudiera haber por tipo de transporte, los estudios no muestran cuanto GNCV consume individualmente cada uno, sin embargo es posible comparar la capacidad de almacenamiento de gas (en litros – L de agua) por cada tipo de vehículo, en la Tabla 2 se muestra esta comparación la cual indica que un bus biarticulado de Transmilenio puede almacenar hasta 25 veces más gas que un automóvil y un tractocamión hasta 19 veces más, de acuerdo a datos obtenidos del Sistema Único de Información Conjunta – SUIC (Organismos de Certificación Acreditados, 2019); adicionalmente según cifras de Transmilenio un bus recorre en promedio por mes más de 6.000 km (Transmilenio S.A, 2020) y de acuerdo a los datos de las pruebas de Promigas, los tractocamiones consumen alrededor de 5.000 m³ al mes (Promigas, 2018). Así se llega a tener la idea de que el transporte masivo y de carga pueden llegar a ser mayores consumidores de GNCV.

Tabla 2. Comparativo de capacidad de almacenamiento en vehículos. Elaboración propia.

	No. De Cilindros	Capacidad unitaria (L)	Capacidad total (L)	Relación vs. Automóvil
Automóvil	1	65	65	1
Biarticulado	8	199	1592	24,49
Tractocamión	8	156	1248	19,2

Los datos estadísticos de Entes como la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME y el Ministerio de Minas y Energía, muestran que el consumo de GNCV entre 2011 y 2018 ha tenido un promedio cercano a los 25.000 MPC por año, como se observa en la Figura 2 (UPME, 2018), notando una tendencia decreciente. Este consumo está representado principalmente en los vehículos convertidos, teniendo en cuenta que solamente desde el año 2019 se ha empezado a incursionar fuertemente en sistemas de transporte masivo y de carga a GNCV, como se mencionó al inicio de esta sección.

En consecuencia, es posible afirmar que el crecimiento acumulado de conversiones ha sido leve en los últimos nueve años, y aproximadamente se han convertido 25.800 vehículos por año, de acuerdo a los boletines estadísticos de la UPME (UPME, 2018). Lo que explica de alguna manera el interés reciente en el mercado de los automotores que usan GNCV, por ejemplo, hacia sectores como el transporte masivo y de carga.

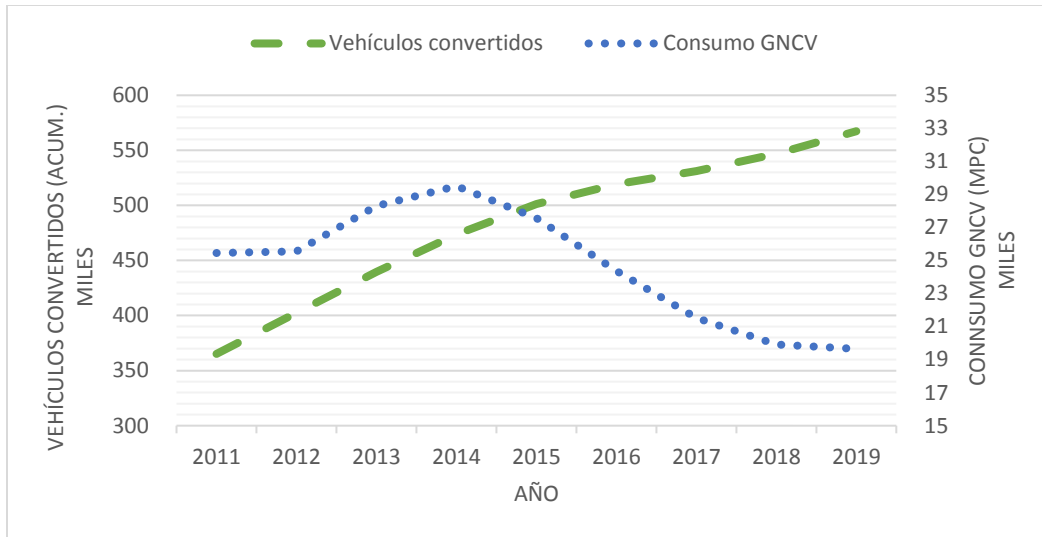


Figura 2. Tendencia de vehículos convertidos (valor acumulado) y consumo de GNCV. Elaboración propia basada en los boletines de la UPME.

Ahora, también es importante contextualizar sobre el aspecto ambiental que ha sido afectado por el sector transporte, toda vez que es el principal contribuyente a las emisiones de CO₂ entre los sectores relacionados con la energía y representa el 10% del inventario nacional de emisiones colombiano (Valderrama, Cadena Monroy, & Behrentz, 2019). Para el año 2016, este inventario tenía cifras como las que se ilustran a continuación (ANDEMOS, 2017):

Tabla 3. Inventario de emisiones del sector transporte. Elaboración propia.

	Tons. / Año				
	CO ₂	CO	NOX	HC	MP 2,5
Totales	61.228.000	3.312.000	556.000	393.000	10.000
Vehículos Livianos	39%	61%	26%	63%	0%
Pasajeros	10%	0%	12%	2%	20%
Carga	42%	2%	59%	6%	80%

Ante este contexto se ha logrado estimar que con políticas de renovación de las flotas de Sistemas de Transporte Público, y reemplazando alrededor de 10.000 vehículos diésel por nuevos vehículos que operen con GNCV, se podría tener una reducción de 11,7 millones de toneladas de CO₂ y de 6.000 toneladas de material particulado (Universidad de los Andes, 2016).

También es importante tener en cuenta que las emisiones de material particulado – PM inciden en la calidad del aire, sobre las cuales la Organización Mundial de la Salud estableció que es uno de los contaminantes más comunes y genera riesgos para la salud, según las Guías de Calidad del Aire (Organización Mundial de la Salud - OMS, 2005). En Colombia ha ocasionado alertas ambientales en las principales ciudades del país, como Bogotá, donde el pasado febrero de 2020 se declaró alerta amarilla debido a la baja calidad del aire que se registró de manera sostenida en los últimos días (Melgarejo, 2020) y Medellín, donde también se declaró estado de alerta por calidad del aire en el Valle de Aburrá y se tomaron medidas de pico y placa ambiental (Oficina Asesora de Comunicaciones, 2020). Pero no solo se ha influenciado negativamente en la calidad del aire, sino que las emisiones del sector transporte también resultan incidiendo en el aumento de emisiones de Gases Efecto Invernadero que están incidiendo en el cambio climático mundial de manera nociva para el planeta y que Colombia se comprometió a reducir en 20% para 2030, las cuales se podrían cuadruplicar para 2050 (Valderrama, Cadena Monroy, & Behrentz, 2019).

Ante este contexto en el presente estudio se pretende mostrar la importancia de proponer una estrategia que permita incrementar el consumo de gas natural para usos vehiculares y con ello la oportunidad que hay para el uso de este combustible, y así también tener mejoramiento del medio ambiente en el país y su contribución positiva a nivel global.

2. MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se dan a conocer los conceptos necesarios para contextualizar el estudio que se llevó a cabo y enmarcar el problema que dio origen al mismo. Primero se ilustran conceptos técnicos referentes a la industria del gas natural y cómo llega a ser usado como combustible vehicular, las tendencias que ha tenido la industria y las diferentes ventajas y desventajas que implica su consumo. Segundo, se explican los conceptos metodológicos que permiten entender cómo se determinó y seleccionó la estrategia objeto de este estudio. Estos conceptos incluyen análisis DOFA, multicriterio, programación por objetivos y Matriz de Cambio.

2.1. CONCEPTOS TÉCNICOS

Es importante conocer los conceptos técnicos que constituyen la base para el desarrollo de este estudio. A continuación se ilustran aspectos como el origen y producción del gas natural, las ventajas y desventajas de su uso en vehículos, el proceso que se sigue para adecuarlo para el suministro a los vehículos y cómo estos se convierten para utilizarlo como combustible; también se ilustra la tendencia que ha presentado el mercado y los ahorros que representa para los usuarios finales.

2.1.1. El Gas natural

El gas natural es un gas inflamable compuesto predominantemente de metano encontrado naturalmente en yacimientos alrededor del mundo, los cuales pueden ser convencionales y no convencionales. Los yacimientos no convencionales son aquellos en los que se obtiene gas de esquisto, gas compacto, gas de acuífero, hidratos biogénicos y de metano. El gas acuífero es producido en acuíferos de agua, el gas compacto es gas natural atrapado en formaciones de roca sedimentaria con baja permeabilidad, el gas de esquisto es un término pobremente definido que se

refiere al gas que es de un depósito orgánico rico y de grano fino, el gas biogénico es gas natural generado a poca profundidad de la degradación de material orgánico y los hidratos de metano corresponden a gas natural atrapado en cristales de hielo. El gas natural convencional es considerado como el gas que se obtiene de rocas, y es diferente a los gases mencionados anteriormente. El gas natural no incluye gases sintéticos hechos por el hombre o el gas metano predominantemente producido en rellenos sanitarios, abono o a partir de descomposición vegetal que generalmente se denomina biogás (Mohr & Evans, 2011).

2.1.1.1 Ventajas

Las principales ventajas del uso del gas natural como combustible pueden agruparse en mecánicas y ambientales. En primer lugar, las ventajas mecánicas que tiene el uso del GNCV están relacionadas con que se puede tener una combustión hasta 7 veces más rápida, tomando en cuenta que la masa molar del gas natural (16g/mol) es inferior a la de la gasolina (114,23 g/mol) y genera una mejor mezcla combustible-aire mejor que la que genera la gasolina (Imran Khan, Yasmin, & Shakoor, 2015). Respecto a mantenimiento, con el uso de gas hay menos desgaste de las piezas internas de los cilindros del motor, lo que deriva en menos actividades de mantenimiento y por ende de costos. Lo anterior se demostró en una prueba realizada en Washington, donde los gastos de mantenimiento de las flotas de buses con gas fueron más bajos en un 12% que los que usaban diésel (Imran Khan, Yasmin, & Shakoor, 2015). También, una evaluación realizada para Delhi sobre el desempeño operacional y financiero de los buses que usan gas natural como combustible, indicó que la economía promedio de combustible de los autobuses de GNC fue 45% menor que la de la flota de diésel, debido a la eficiencia térmica que permite el ciclo Otto en comparación con el ciclo diésel. Respecto a la gasolina, el GNCV tiene mejor relación de octano y los motores obtienen una mayor relación de compresión (Krelling & Badami, 2016).

Adicionalmente, otra ventaja mecánica está en el rendimiento del motor dado que los vehículos a GNCV ofrecen un rendimiento superior en comparación con el equivalente de gasolina y diésel porque el gas natural tiene un mayor octanaje y un menor número de cetano y no requiere aditivos antidetonantes, como lo indica un estudio realizado sobre el desarrollo del gas natural como combustible en Nigeria (Ogunlowo, Bristow, & Sohail, 2015).

En segundo lugar, el uso del gas natural genera un menor impacto ambiental que el de otros combustibles fósiles como la gasolina y el diésel, por su baja emisión de material particulado y gases de efecto invernadero. Por ejemplo, en India y Brasil, las políticas gubernamentales obligaron al cambio del parque automotor de servicio público para que se usara gas natural comprimido como combustible en lugar del diésel y la gasolina. En Delhi se registró una reducción en la emisión del 14% de partículas suspendidas, 10% de monóxido de carbono (CO), 22% dióxido de azufre (SO₂) y 6% óxido de nitrógeno (NO_x); mientras que en Brasil, la reducción fue de 53% de CO y 20% de CO₂ (Imran Khan, Yasmin, & Shakoor, 2015). En Milán se renovó la flota de camiones recolectores de basura que usaban combustibles convencionales como la gasolina y el diésel, a vehículos que usarán GNCV, esto resultó en que entre 2005 y 2010 hubiera reducción de material particulado de un 32% (Pastorello, Dilara, & Martini, 2011).

En cuanto a emisión de gases de efecto invernadero, se han hecho evaluaciones de impacto ambiental cuyos resultados concluyen que los vehículos que funcionan con gas natural producen un 29% menos de estos gases que aquellos que funcionan con gasolina y 22% menos que los autos diésel (Imran Khan, Yasmin, & Shakoor, 2015). En un estudio hecho en Estados Unidos, se tomaron muestras de los gases de escape de 7 diferentes vehículos con motores diésel y gas natural comprimido, de diferentes modelos de año, recorriendo varios tipos de vías en California, para determinar las emisiones de gases efecto invernadero (ver Tabla 4) (Quiros, Smith,

Thiruvengadam, Huai, & Hu, 2017). Los resultados de la investigación mostraron que los automotores que usaron GNCV emitieron en promedio 9,6% menos del total de gases efecto invernadero que los vehículos a diésel. En el primer caso, las emisiones de fueron de 3,565 g CH₄/mi y de 1,894 g CO₂/mi, en tanto que para el diésel tan solo presentaron un promedio de 0,02 g CH₄ /mi y de 2,190 g CO₂/mi, es decir que la mayor concentración de gases efecto invernadero para el diésel se presentó en las emisiones de CO₂. Lo anterior significa que, las emisiones de metano (CH₄) para el GNCV son superiores a las de diésel, pero las emisiones de total de gases efecto invernadero de GNCV son inferiores. Este total de gases efecto invernadero se refiere a las emisiones equivalentes de CO₂ (CO₂-eq) emitidas desde el tubo de escape, establecidas por el Fourth Assesment Report (AR4) del Panel Intergubernamental del Cambio Climático – IPCC, que corresponden a 1, 25 y 298 veces para CO₂, CH₄ y N₂O, respectivamente y cuyos cálculos son los que se presentan en la Tabla 4 (Forster, y otros, 2007).

Adicionalmente, el GNCV puede causar reducciones entre el 96% y 98% de material particulado respecto al diésel (Wang, Xing, Xu, & Du, 2016); lo cual incide favorablemente sobre la salud y la vida de las personas, evitando enfermedades respiratorias y cardiovasculares, cáncer y muertes, que en 2017 ascendieron a 4.9 millones a nivel mundial (Joaquim Rovira, 2020).

Tabla 4. Emisiones promedio de viaje por milla. (Quiros, Smith, Thiruvengadam, Huai, & Hu, 2017)

Velocidad promedio	Distancia	Trabajo/ Distancia	Relación de emisiones en vehículos [g/mi]			
			CO2	N2O	CH4	Total GHG (CO2-eq)
[mph]	[mi]	[bhp-hr/mi]				
¶ Conventional (DOC + DPF) - Vehículo 1						
53,2	74,1	4,3	2445	0,013	0,005	2449
52,3	81,7	2,2	1516	0,016	0,005	1521
32,9	241	2,7	1815	0,023	0,01	1823
19,6	22	3,7	2457	0,069	0,001	2477
7,8	7,3	3,1	3015	0,129	0,061	3055
¶ Híbrido (DOC + DPF) - Vehículo 6						
32,2	57,1	3,8	2468	0,027	0,036	2477
51,4	56,7	2,8	1825	0,013	0,014	1829
34,2	147	2,8	1792	0,018	0,027	1799
14,3	21,9	3,7	2475	0,026	0,024	2483
6,6	7,4	3,2	2377	0,022	0,033	2385
15,9	33,7	4	2567	0,04	0,032	2580
¶ Diesel Conventional (DOC + DPF + SCR) - Vehículos 2, 4, 5, & 7						
44,6	426	4,3	1936	0,173	0,007	1988
50,7	2160	3,2	1465	0,172	0,005	1516
30,6	904	3,4	1667	0,294	0,01	1755
16,8	78	4,5	2072	0,389	0,018	2220
8,2	29,5	4	2604	0,221	0,033	2671
18	101	5,4	2687	0,821	0,02	2933
(TWC) - Vehículo 3						
40	94,5	4,8	2088	0,111	5,030	2246
50,8	213,4	2,8	1317	0,1	2,885	1419
36,1	233,2	3,2	1484	0,033	2,387	1553
15,6	21,9	3,5	2214	0,008	1,286	2248
9,2	7,4	3,2	2369	0,383	6,240	2639

2.1.1.2 Desventajas

Contrario a estos beneficios del uso de gas natural, hay algunos perjuicios que se ven reflejados en aspectos de deficiencias de desempeño del motor del vehículo, por razones como la baja velocidad de llama del gas que afecta la duración de la combustión, la eficiencia volumétrica

que es menor (Imran Khan, Yasmin, & Shakoor, 2015), y la baja potencia de salida, que según estudios puede llegar hasta un 30% menos que la alcanzada con combustibles fósiles (Mello, Pelliza, Catalun, & da Silva, 2006). En un estudio hecho en Pakistán se comparó el consumo de energía de gasolina, diésel y GNCV y se concluyó que este último tiene un 5 a 17% menos eficiencia que la gasolina y 23 a 36% menos que el diésel, dependiendo la tecnología del motor (Khan, Shahrestani, Hayat, Shakoor, & Vahdati, 2019).

Otra desventaja es que el vehículo puede sufrir mayor deterioro con el cambio de combustible, ya que la instalación y transporte del cilindro de almacenamiento del gas, su geometría y masa varían, afectando directamente la suspensión del vehículo y restando capacidad del mismo en cuanto a disponibilidad de carga para transportar.

Pero ambientalmente, también hay desventajas para el GNCV dadas las emisiones que genera. Así como se analizó en la sección anterior, si bien en las pruebas realizadas en Estados Unidos arrojaron resultados de disminución del 13% del total de gases efecto invernadero, particularmente las emisiones de metano (CH_4) fue muy superior (Quiros, Smith, Thiruvengadam, Huai, & Hu, 2017), y es de tener en cuenta que este gas es la principal sustancia combustible del gas natural (Hu, y otros, 2018). En un estudio de varias ciudades de China se concluyó que los vehículos convertidos a GNCV arrojaron un inventario de 196 Kg de metano por vehículo por año, siendo el responsable del 23% de las emisiones de este gas en 2010 en este país (Hu, y otros, 2018).

2.1.2. Gas Natural Comprimido para uso Vehicular – GNCV

El *Gas natural comprimido para uso vehicular (GNCV)*, por definición, es una mezcla de hidrocarburos, principalmente metano, cuya presión se aumenta a través de un proceso de compresión y se almacena en recipientes cilíndricos de alta resistencia, para ser utilizado como combustible en vehículos automotores (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2012). Estos

vehículos pueden ser aquellos fabricados para funcionar con gasolina y que son convertidos por medio de la instalación de equipos y componentes para operar de manera dual con gasolina y GNCV, pero también pueden ser vehículos dedicados², cuyos motores han sido diseñados y fabricados para operar únicamente gas natural (ICONTEC, 2018).

La Figura 3 muestra el esquema de una estación de suministro de GNCV, en el que se observa que cuando el compresor es encendido, el gas se comprime y fluye hacia la cascada de almacenamiento por medio del panel de prioridad, que a su vez determina el depósito conectado al compresor en almacenamientos de alta, media y baja presión. El gas almacenado es transferido a los tanques de los vehículos a través de los surtidores. La demanda de gas en el surtidor determina los niveles de gas en el almacenamiento de la cascada y por ende la presión (Kagiri, Zhang, & Xia, 2017).

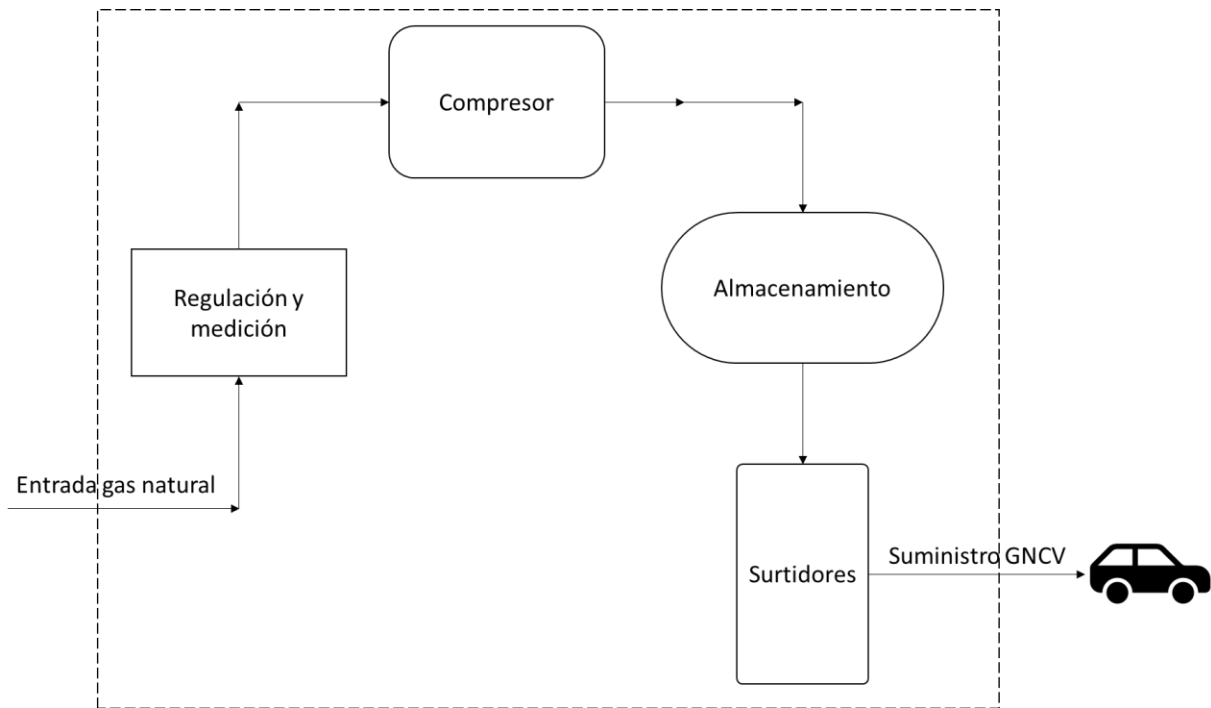


Figura 3. Esquema de funcionamiento de una estación de servicio que suministra GNCV. Elaboración propia.

² Los vehículos dedicados son aquellos que funcionan únicamente con gas natural. (ICONTEC, 2018).

2.1.3. El Gas Natural Licuado – GNL

Como se mencionó en la sección 2.1.1, usualmente el gas natural es obtenido de yacimientos naturales que se encuentran en campos de producción; pero para casos en donde las reservas son escasas se podría contar con la opción de transportar gas natural desde otros lugares. Para hacer esto, lo mejor es transportar el gas en estado líquido, conocido como Gas Natural Licuado – GNL.

El Gas Natural Licuado – GNL – es gas natural que temporalmente se ha convertido en estado líquido para la facilidad de almacenamiento y transporte a bajo costo, dado que al licuarlo su volumen disminuye 600 veces aproximadamente, a temperatura ambiente. Para producir GNL, el gas natural debe ser separado de sus contaminantes para evitar problemas en el proceso de licuefacción. Luego, este gas natural purificado (gas dulce y seco) es enviado al proceso de licuado para obtener gas natural condensado a presión atmosférica y a temperaturas inferiores a los -160°C (Pellegrini, Guido, & Valentina, 2019). El GNL es producido cerca de los yacimientos de gas natural donde es tratado para eliminar impurezas y usualmente es licuado por proceso de cascada, refrigerante mezclado o proceso expandido (Ancona, y otros, 2018).

2.1.4. Conversión a gas natural vehicular

En esta sección se explica de manera sencilla el funcionamiento de los vehículos con gas natural comprimido, partiendo del funcionamiento de los vehículos convencionales, los cuales por medio de la combustión de combustibles líquidos, y con un mecanismo biela-manivela-corredera, configuran un motor que da una salida de movimiento rotacional, para finalmente impulsar las ruedas del auto, con transmisión de energía mecánica.

Dentro de estos motores, la combustión se lleva a cabo en una *cámara de combustión*, en la cual se mezcla combustible y aire. Una chispa eléctrica, genera una explosión interna y desplaza los pistones, que a su vez hacen rotar el cigüeñal. Para el caso de vehículos convertidos a gas

natural comprimido, el funcionamiento es el mismo pero con combustible diferente. En este caso, la combustión se hace con GNCV y realiza la misma operación que una combustión convencional.

Sin embargo, dado que los vehículos normalmente están fabricados para trabajar con combustibles líquidos, a la mayoría hay que hacerle la conversión a gas que en esencia considera la instalación de equipos, componentes y accesorios en el automóvil para la operación con el GNCV, así como las evaluaciones previas y posteriores para garantizar que la conversión sea la apropiada para cada auto. Los principales componentes que se deben instalar son: el cilindro, que es donde se va a almacenar la reserva de gas; la tubería por la cual se va a transportar el gas hacia el motor; un regulador que reduce la presión del gas para su entrada al motor; el riel de inyectores que es por donde se inyectará el gas a las cámaras de combustión y otros accesorios para el monitoreo y control del flujo del gas dentro de este sistema (manómetros, computadora, válvulas, sensores, dispositivo electrónico de identificación vehicular – chip).

2.1.4.1 Tendencia de la conversión de vehículos

Ahora bien, es pertinente revisar cómo ha sido el comportamiento de las conversiones de vehículos en Colombia. Según un estudio de Concentra, para el año 2019 el número de automóviles convertidos ascendió a unas 570.000 unidades (Concentra, 2020).

En la Figura 4 se observa la tendencia del acumulado de conversiones de vehículos en Colombia desde 2002. Dicha tendencia presentó un pico sobresaliente para el año 2006, en el que se convirtieron alrededor de 72.000 vehículos y en el año 2011 se presentó otro pico de 40.000 unidades, sin embargo, para los años 2003, 2009, 2010 y 2017 apenas se presentaron entre 11.000 y 22.000 conversiones. Se puede observar también que en los últimos dos años (2017 a 2019) hay una tendencia creciente, aunque leve en comparación el crecimiento que hubo entre los años 2003 a 2006 que fue la época con mayor crecimiento. De acuerdo con lo anterior se concluye que ha

habido una media de aproximadamente 31.600 conversiones anuales en el país y que la tendencia ha sido más hacia el decrecimiento de este mercado.

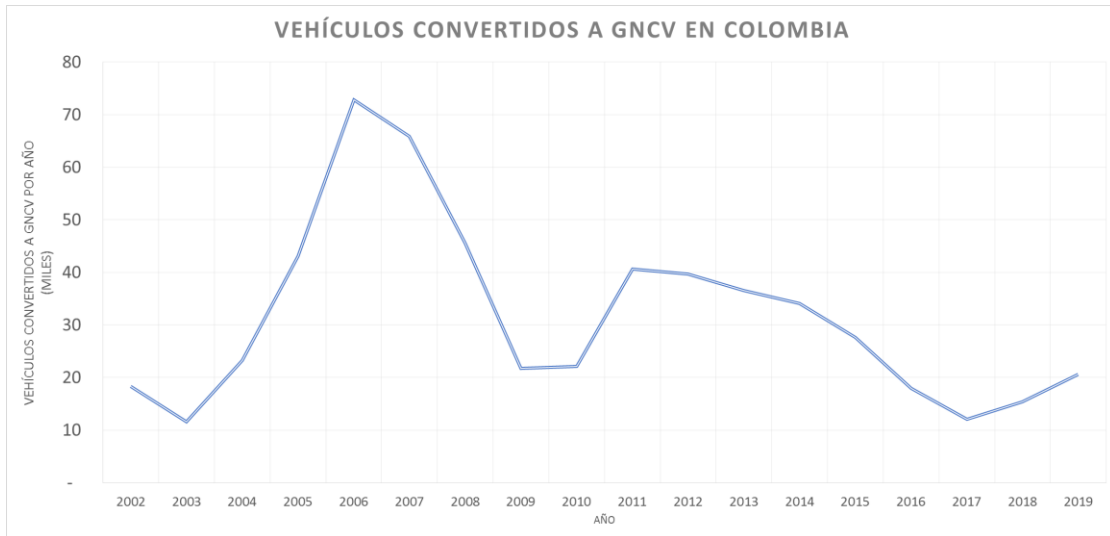


Figura 4. Acumulado de vehículos convertidos en Colombia. Elaboración propia basada en (Concentra, 2020).

2.1.4.2 Ahorros en combustible con el consumo de GNCV

Es importante tener en cuenta que una fuerte razón por la cual los usuarios convierten su vehículo a GNCV son los ahorros que pueden tener en compra de combustible, dada su ventaja de precios competitivos respecto a la gasolina o el diésel. Lo que amerita hacer un análisis comparativo del gasto en la compra de combustible por parte de los consumidores de GNCV y gasolina.

El análisis se hace de acuerdo con datos históricos recopilados por el autor basados en los consumos que han tenido conductores de vehículos convertidos, principalmente taxis, se puede estimar que un vehículo que recorre en promedio 45 kilómetros por cada galón de gasolina tiene una equivalente de recorrido en GNCV de 13,5 kilómetros por m^3 de gas, y que un taxi en Bogotá puede estar recorriendo 7.500 km al mes. Considerando el valor de venta del galón de gasolina (\$9.000/galón) y del metro cúbico de gas (\$1.500/ m^3), a costos de marzo de 2020, el usuario del

vehículo gastaría cerca de \$800.000 en GNCV y \$1.500.000 en gasolina para efectuar el mismo recorrido, significando un ahorro aproximado al 56%, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Cálculo convencional del ahorro por consumo de GNCV con respecto al consumo de gasolina. Elaboración propia.

Recorrido mensual		7.500 km	
Gasolina	Rendimiento vehículo	45	km/gal
	Consumo mes	166,67	galones
	Precio	\$ 9.000	galón
	Total gasto mensual	\$ 1.500.000	
GNCV	Rendimiento vehículo	13,50	km/m ³
	Consumo mes	555,56	m ³
	Precio	\$ 1.500	m ³
	Total gasto mensual	\$ 833.333	
Ahorro		55,56%	
		\$ 666.667	

Con este análisis se muestran los ahorros en el gasto de combustible por parte de los usuarios para el GNCV vs gasolina, los cuales son alrededor del 55%, como sucede en la mayoría de las regiones del mundo donde estos ahorros representan la mitad del costo de los combustibles convencionales, así como lo concluyen estudios realizados por Khan, Kakaee y Paykani sobre países como China, Irán, Pakistán, Argentina, India, Brasil, Italia, Estados Unidos, Alemania, Suecia y Corea del Sur (Khan M. , 2017) (Kakaee & Paykani, 2013).

Adicionalmente, cabe recordar las ventajas mecánicas que se expusieron en la sección 2.1.1.1, que señalan que con el uso de gas hay menos desgaste de las piezas internas de los cilindros del motor, lo que deriva en menos actividades de mantenimiento y por ende de costos, como se concluyó en la prueba realizada en Washington, donde los gastos de mantenimiento para las flotas de buses con gas fueron un 12% más bajos que los que usaban diésel (Imran Khan, Yasmin, & Shakoor, 2015). Así mismo, en la evaluación realizada para Delhi sobre el desempeño operacional y financiero de los buses que usan gas natural como combustible, indicó que el costo promedio de

uso del combustible de los autobuses de GNC fue 45% menor que la de la flota de diésel (Krelling & Badami, 2016). Así, se observa que los ahorros económicos para los usuarios pueden ser aún mayores con gas natural como combustible vehicular.

No obstante, hay autores que señalan que costos como los de operación y mantenimiento de un vehículo que usa GNCV se pueden asumir como equivalentes a los que usan diésel o gasolina, según se justificó en un estudio realizado sobre el desarrollo del gas natural como combustible vehicular en el que se consideraron las barreras financieras que podrían presentarse (Khan M. , 2017) y que está fundamentado por el insumo del ciclo de vida ambiental y económico del combustible alternativo para el transporte (AFLEET) (Burnham, 2020).

En conclusión, se reafirma que los ahorros en combustible es otra ventaja para el GNCV y que es un buen referente para estimular su uso en las aplicaciones vehiculares. Un análisis económico comparativo más profundo y detallado que contemple costos individualizados para vehículos con cada tipo de combustible, podría ser objeto de otro estudio.

2.2. CONCEPTOS PARA DESARROLLO METODOLÓGICO

La búsqueda de una estrategia que revierta las tendencias decrecientes que ha mostrado el consumo del GNCV en Colombia requirió la integración de herramientas metodológicas que tomaran en cuenta los factores que inciden en la industria del gas natural, así como las perspectivas de las partes involucradas, para poder seleccionar la estrategia más apropiada y revisar su impacto en la implementación. Este estudio integró metodologías de análisis DOFA, análisis Multicriterio, Programación por Objetivos y Matriz de Cambio. Esta aproximación integral de la metodología constituye una contribución importante de este trabajo. En la literatura se encontraron aplicaciones separadas de las metodologías mencionadas. Pocos autores han integrado el análisis DOFA con

GP – *Goal Programming* (Khan I. M., 2018); otros, han recurrido al uso de AHP (Solangia, Tan, Mirjat, & Ali, 2019) (Kajanus, Leskinen, Kurttila, & Kangas, 2012) (Lee & Walsh, 2011), de ANP – *Analytic Network Process* y fuzzy TOPSIS – *fuzzy Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution* (Ervural B. , Zaim, Demirel, Aydin, & Delen, 2018). No se encontraron estudios que integraran las cuatro metodologías objeto del presente análisis.

Partiendo del objetivo general que indica que se requiere de la formulación de una estrategia, el análisis DOFA es una técnica que ayuda para lograrlo, teniendo en cuenta que fue útil en estudios sobre la industria de gas natural en Irán y de energía sostenible en Pakistán y de los cuales se obtuvieron recomendaciones de estrategias para evaluar cada uno de los casos (Khan I. M., 2018) (Solangia, Tan, Mirjat, & Ali, 2019). Las metodologías DOFA son útiles para formular estrategias que toman en consideración los factores internos y externos, en este caso de una industria como la del GNCV. Adicional a lo anterior, se requirió de un análisis multicriterio que permitiera seleccionar la mejor estrategia, con base en las percepciones y evaluación de las diferentes opciones por parte de expertos e involucrados en la industria y, para el caso de Irán, se optó por la programación por objetivos (GP por sus siglas en inglés) y en el caso de Pakistán se realizó un proceso de análisis jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) (Khan I. M., 2018) (Solangia, Tan, Mirjat, & Ali, 2019).

Finalmente, para evaluar el impacto de la estrategia seleccionada, fue importante revisar cómo se podría dar la transición al objetivo propuesto de aumentar el consumo de GNCV, teniendo en cuenta que ya se cuentan con algunas prácticas que la industria ha procurado para incentivar su uso. Para esto, la metodología de la Matriz de Cambio resultó apropiada dado que su desarrollo se realiza a partir de procesos existentes para evaluar la dificultad de llegar a los nuevos procesos, a los que apunta el nuevo objetivo o estrategia y se analiza el cambio (Brynjolfsson, Renshaw, &

Alstyne, 1997). Un estudio sobre evaluación de factores que influyen sobre la implementación de vehículos eléctricos en Colombia utilizó esta metodología, demostrando su aplicabilidad para energéticos alternativos en automotores de transporte terrestre (Reinemer, 2018). En esta sección se presenta la fundamentación teórica sobre cada una de las metodologías integradas.

2.2.1. ANÁLISIS DOFA

DOFA es un acrónimo de las palabras *Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas* (*SWOT – Strengths, Weaknesses, Opportunities y Threats*). El análisis DOFA es una metodología que apoya la formulación de estrategias para analizar los entornos internos y externos de las organizaciones (Nikolaou & Evangelinos, 2010), así como la planeación estratégica dado que los factores que afectan el sistema son revisados en detalle y sistemáticamente (Khan I. M., 2018). Las fortalezas y debilidades se refieren al ambiente interno y las oportunidades y amenazas al entorno. La matriz DOFA permite definir estrategias a partir de la combinación de fortalezas y oportunidades (FO), debilidades y oportunidades (DO), fortalezas y amenazas (FA) y debilidades y amenazas (DA). En consecuencia, el análisis DOFA provee las bases para formular una estrategia que permita maximizar fortalezas y oportunidades, y minimizar debilidades y amenazas (Ervural, Zaim, Demirel, Aydin, & Delen, 2018). Al identificar oportunidades y amenazas, fortalezas y debilidades, las organizaciones pueden desarrollar estrategias basadas en sus fortalezas, desvanecer las debilidades, obtener el máximo beneficio utilizando las oportunidades y neutralizando las amenazas (Shariatmadari, Sarfaraz, Hedayat, & Vadoudi, 2013).

Los factores DOFA no son independientes entre sí, pues existe una relación entre ellos, aunque generalmente, el peso de los factores se calcula sobre el principio de que los factores son independientes entre sí. Los cambios de peso en los factores pueden causar cambios en la priorización de las estrategias (Shariatmadari, Sarfaraz, Hedayat, & Vadoudi, 2013).

En general, la matriz DOFA apoya la formulación de estrategias, las cuales deben maximizar las fortalezas y oportunidades y minimizar las amenazas y debilidades. Por lo tanto, en la matriz se buscan combinaciones lógicas que respondan las siguientes preguntas para definir cuatro tipos de estrategias (FO, FA, DO y DA) (Rauch, Wolfsmayr, Borz, & Triplat, 2015):

¿Qué fortaleza se ajusta a cuál oportunidad? – Estrategias FO

¿Qué fortaleza se ajusta a cuál amenaza? – Estrategias FA

¿Qué debilidad se ajusta a cuál oportunidad? – Estrategias DO

¿Qué debilidad se ajusta a cuál amenaza? – Estrategias DA

Una buena estrategia significa garantizar un ajuste entre la situación externa que enfrenta una empresa (amenazas y oportunidades) y sus propias cualidades o características internas (fortalezas y debilidades), por lo que se puede considerar que la estrategia refleja una idea de ajuste en términos funcionales. La literatura moderna sobre estrategia todavía sigue obligando a usar el análisis DOFA, aunque algunos autores tengan reservas sobre su aplicación (Hill & Westbrook, 1997). DOFA sigue siendo un análisis fundamental para el proceso de elaboración de estrategias, para otros autores como Mintzberg, quien cree que la formulación de la estrategia es un proceso de concepción que implica el uso de algunas ideas básicas para su diseño (Mintzberg, 1994) (Kazemi, Abolhassani, Rahmati, & Sayyad-Amin, 2018).

En la aplicación de un análisis DOFA como herramienta para generar y clasificar estrategias óptimas, se han desarrollado numerosas herramientas para la toma de decisiones multicriterio, que han ampliado su aplicación y han abierto muchas oportunidades para la toma de decisiones objetivas (Arsić, Nikolić, & Živković, 2017).

Si se usa correctamente, el análisis DOFA puede proporcionar una buena base para la formulación exitosa de estrategias... Un buen ejemplo de análisis DOFA puede ser el que se realizó

en Irán se realizó para proponer y evaluar estrategias de gas natural comprimido (Khan I. M., 2018). Sin embargo, como los procesos de planificación a menudo se complican por numerosos criterios e interdependencias, puede ser que la utilización de DOFA no sea suficiente (Chang & Huang, 2006). Debido a que este método tiene la limitación relacionada con la imposibilidad de medirse de manera cuantitativa, es decir que no es fácil determinar cómo clasificar de manera objetiva las estrategias y los factores, se hace necesario integrarlo con otras técnicas para darle una cuantificación a cada criterio que ayude a la toma de decisiones (Kurttila, Pesonen, Kangas, & Kajanus, 2000). En este trabajo el análisis DOFA se integra con tres metodologías: análisis multicriterio, programación por objetivos y matriz de cambio según se refiere en las siguientes secciones.

2.2.2. Análisis Multicriterio

El análisis multicriterio (Multicriterio Decision Making – MCDM) es una herramienta usada para tomar decisiones gerenciales bajo múltiples condiciones objetivas. Para resolver un problema se suscitarían muchas opciones a escoger y con este método se puede determinar la más apropiada para una situación particular dada, que tenga en cuenta la mayoría de los criterios. Esta metodología ha sido aplicada en diversos campos. Por ejemplo, ha sido utilizada exitosamente para planeación energética y análisis de procesos políticos, teniendo en cuenta que las políticas de transporte terrestre requieren considerar múltiples objetivos y reunir intereses de los involucrados y criterios de sostenibilidad (Khan I. M., 2018).

El principal aporte de esta metodología es que permite tratar con las dificultades que se presentan con el manejo de grandes y complejas cantidades de información y datos, en una forma consistente. MCDM puede usarse para identificar una mayoría simple de opciones preferidas, un rango de opciones, una lista de opciones limitadas para una estimación detallada subsecuente o

para diferenciar posibilidades aceptables de inaceptables (Dodgson, Spackman, Pearman, & Phillips, 2009).

Igualmente, hay muchas técnicas para MCDM, debido a los diferentes tipos de decisión en determinadas circunstancias, los tiempos disponibles para los análisis, la cantidad y naturaleza de los datos disponibles, las habilidades analíticas y los requerimientos y culturas administrativas diversas que existen (Dodgson, Spackman, Pearman, & Phillips, 2009).

De manera complementaria, el concepto de toma de decisiones – *Decision Making* – fue la base para comprender la metodología que permitió formular alternativas de solución al problema planteado. Con este concepto se desarrolla un proceso en el que se busca establecer las motivaciones y el contexto de la decisión que se pretende determinar. Como resultado se generan e identifican buenas alternativas, se comparan objetivamente y se formulan decisiones estratégicas, con elementos que alineen la situación y la motivación de la elección. Finalmente se han de eliminar las soluciones que no son factibles y categorizar las restantes. La Figura 5 muestra un esquema básico del proceso de toma de decisiones (Jack, 2013).

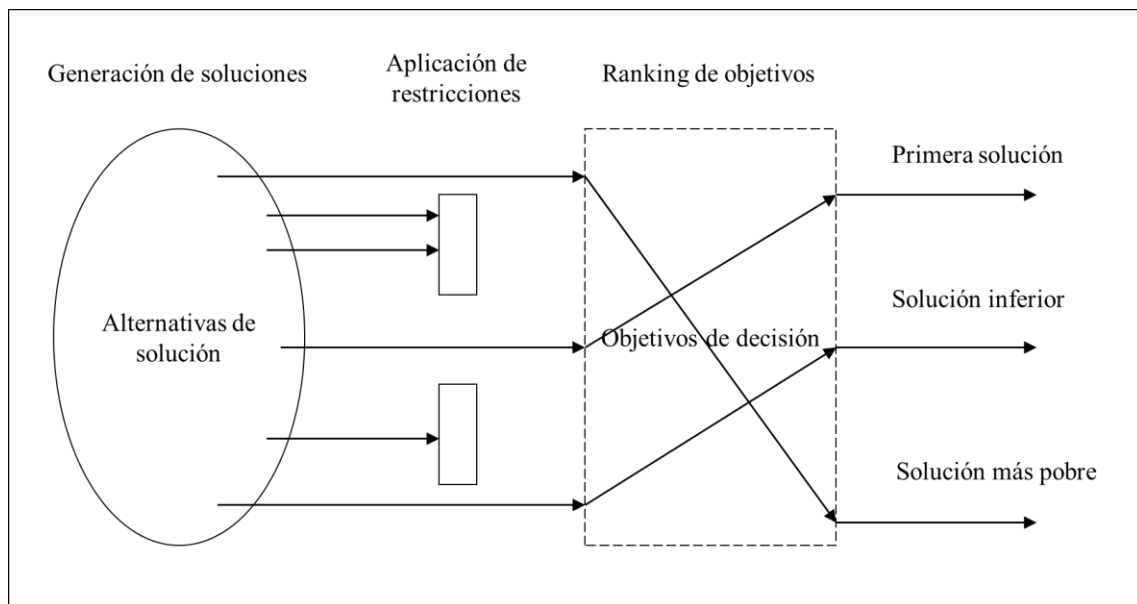


Figura 5. Esquema básico del proceso de toma de decisiones. (Jack, 2013).

2.2.3. Programación por objetivos – *Goal Programming*

La Programación por Objetivos o *Goal Programming -GP-* es un método de programación matemática que consiste en optimizar una función objetivo hacia un valor mínimo, estableciendo ciertas restricciones. Se desarrolla a partir de la programación lineal y multi-objetivo. El método divide múltiples objetivos en un objetivo principal y muchos sub-objetivos, y estos se transfieren a una ecuación restrictiva como parte de las restricciones del modelo (Li, y otros, 2017).

La forma en que la programación por objetivos determina una solución convertirá partir de la conversión de desigualdades en una meta flexible en la cual la restricción correspondiente pueda ser alterada, si es necesario. Se utilizan variables no negativas como **variables de desviación**, las cuales representan las desviaciones *superiores* e *inferiores* del lado derecho de una restricción. Las variables de desviación son dependientes por definición, y de ahí que no pueden ser las variables básicas al mismo tiempo (de acuerdo con la teoría del método simplex). Lo anterior, significa que en cualquier iteración simplex, no más de una de las dos variables de desviación puede asumir un valor positivo. Si una desigualdad original es del tipo *menor que* y su desviación es mayor a 0, entonces se satisface el objetivo; en caso contrario, no se satisface. Éste es el tipo de flexibilidad que caracteriza a la programación de metas cuando se busca una buena solución objetivo, en la que se deberá minimizar la cantidad de iteraciones por la que se afecte la meta (Taha, 2012).

Existen dos algoritmos para resolver la programación de metas. Ambos métodos se basan en la representación de múltiples metas por una sola función objetivo. En primer lugar, el método de pesos, la función objetivo única es la suma ponderada de las funciones que representan las metas del problema. En segundo lugar, el método preventivo inicia priorizando las metas por orden de importancia. Luego, el modelo optimiza las metas de una en una en el orden de prioridad de modo que no degrade una solución de más alta prioridad. Por lo común, los dos métodos

propuestos no presentan la misma solución. Ninguno de los métodos, sin embargo, es superior al otro porque las dos técnicas presuponen preferencias distintas en la toma de decisiones (Taha, 2012).

Para manejar de una manera práctica los datos requeridos en el *goal programming*, se requieren dos conceptos: *números difusos* y *centro de gravedad*. Estos conceptos ayudan a incorporar los resultados obtenidos, dentro del modelo de programación formulado para optimizar la función objetivo.

2.2.3.1 Números difusos (fuzzy numbers)

Los números difusos proceden de la teoría de conjuntos difusos, que trata de una categorización de membresía que sirve para transformar datos ambiguos en datos útiles y cuantitativos. Tiene la ventaja de expresar la importancia relativa de las alternativas y los criterios con números difusos en lugar de utilizar un número nítido, ya que en la realidad la mayoría de los tomadores de decisiones lo hacen en condiciones en las que los datos relevantes y las secuencias de acciones posibles no se identifican con precisión (Khan I. M., 2018).

Matemáticamente hablando, un número difuso (fuzzy number) es un conjunto de posibles valores *conjuntos difusos* (fuzzy sets), que varían con un peso entre 0 y 1. Estos conjuntos representan una técnica matemática adecuada para la descripción de imprecisión y ambigüedad. Normalmente, la ambigüedad describe la dificultad de obtener afirmaciones concisas con respecto a un dominio dado. Por otro lado, en la teoría de conjuntos difusos, la alternativa de respuestas sí no puede expandirse infinitamente. De esta manera, la teoría de conjuntos difusos no solo se ocupa de la ambigüedad, sino que representa una teoría del razonamiento de matiz (AnkeMeyer-Baese & VolkerSchmid, 2014).

2.2.3.2 Centro de Gravedad (CoG).

El método de centro de gravedad (CoG) es una de las técnicas de solución más populares en las matemáticas difusas. Este método sugiere formular un conjunto de caracterizaciones o denominaciones lingüísticas difusas, es decir, una especie de escala que podría ir de Excelente (A) a Insatisfactorio (F) – Excelente (A), Muy Bueno (B), Bueno (C), Regular (D) e Insatisfactorio (F) – respecto de miembros de un grupo. Trata de asignar a los miembros de un grupo, como por ejemplo las calificaciones de un estudiante, que se caracterizarían así (Voskoglou, 2016): F : 0-1, D : 1-2, C : 2-3, B : 3-4, A : 4-5.

2.2.4. Matriz de Cambio

La matriz de cambio es una metodología que ayuda a caracterizar las cualidades de la gestión del cambio como la factibilidad de los cambios propuestos, la velocidad de ejecución y la mejor secuencia de los cambios. Es útil para evaluar el cambio entre las antiguas y las nuevas formas que pueden ser difíciles y que consumen tiempo y considera el hecho que las interacciones entre las diversas prácticas de trabajo pueden llevar a numerosos efectos secundarios no anticipados, ya que se modifican prácticas individuales sin tener en cuenta sistemas de trabajo completos. El desarrollo de la matriz de cambio se realiza a partir de procesos existentes para evaluar la dificultad de llegar a los nuevos procesos, a los que apunta el nuevo objetivo o estrategia y se analiza el cambio (Brynjolfsson, Renshaw, & Alstyne, 1997).

El sistema de Matriz de Cambio consta de tres matrices y un conjunto de evaluaciones de las partes interesadas, como se ve en la Figura 6. Las matrices representan la colección actual de prácticas organizacionales, la colección deseada y un estado de transición que une estas dos. Las evaluaciones de las partes interesadas brindan una oportunidad para que las personas dentro de la industria indiquen la importancia de estos procesos.

Esta herramienta presenta una manera de capturar conexiones entre prácticas. Muestra gráficamente los procesos organizativos tanto de refuerzo como de interferencia. Los procesos de refuerzo son aquellos que se complementan, indistintamente si significan aspectos positivos o negativos, y los procesos de interferencia son aquellos que se contradicen o no van alineados en ningún sentido. Con estos se pueden usar principios intuitivos para buscar puntos de apalancamiento y diseñar una transición más suave. Una vez que se han trazado los esquemas generales del nuevo sistema y la ruta de transición, se puede descentralizar de manera más efectiva para la implementación y optimización.

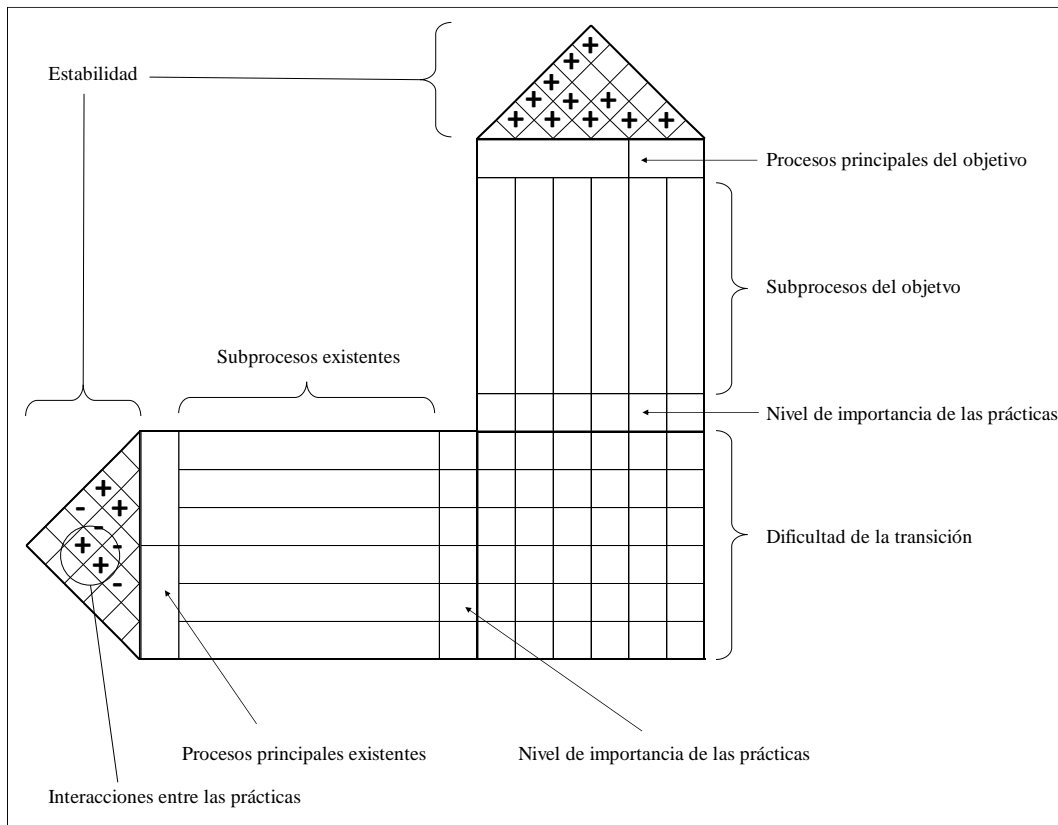


Figura 6. Esquema de una Matriz de Cambio. Elaboración propia del autor.

Con el uso de la matriz de cambio, se pueden anticipar las complejas interrelaciones que rodean el cambio. Específicamente, la herramienta contribuye a comprender los problemas de viabilidad, secuencia, ubicación, ritmo e intereses de los interesados (Brynjolfsson, Renshaw, & Alstynne, 1997).

3. METODOLOGÍA

Con el fin de plantear la propuesta de estrategia que sirva para revertir la tendencia decreciente del consumo de GNCV y solucionar la problemática objeto de esta investigación, fue necesario trazar una metodología que tomara en cuenta los factores que inciden en la industria del gas natural y las perspectivas de las partes involucradas. Para ello se integraron las metodologías de análisis DOFA, análisis Multicriterio, Programación por Objetivos y Matriz de Cambio.

Dichas metodologías se articularon como se ilustra en la Figura 7, en la que se observa el *análisis DOFA* que incluye los factores que inciden en la industria para la formulación de las posibles estrategias, el *análisis multicriterio* que considera la posición de las partes involucradas para la selección de la estrategia más apropiada por medio de una *programación por objetivos* y finalmente la revisión de su impacto en la implementación a través de una *matriz de cambio*.

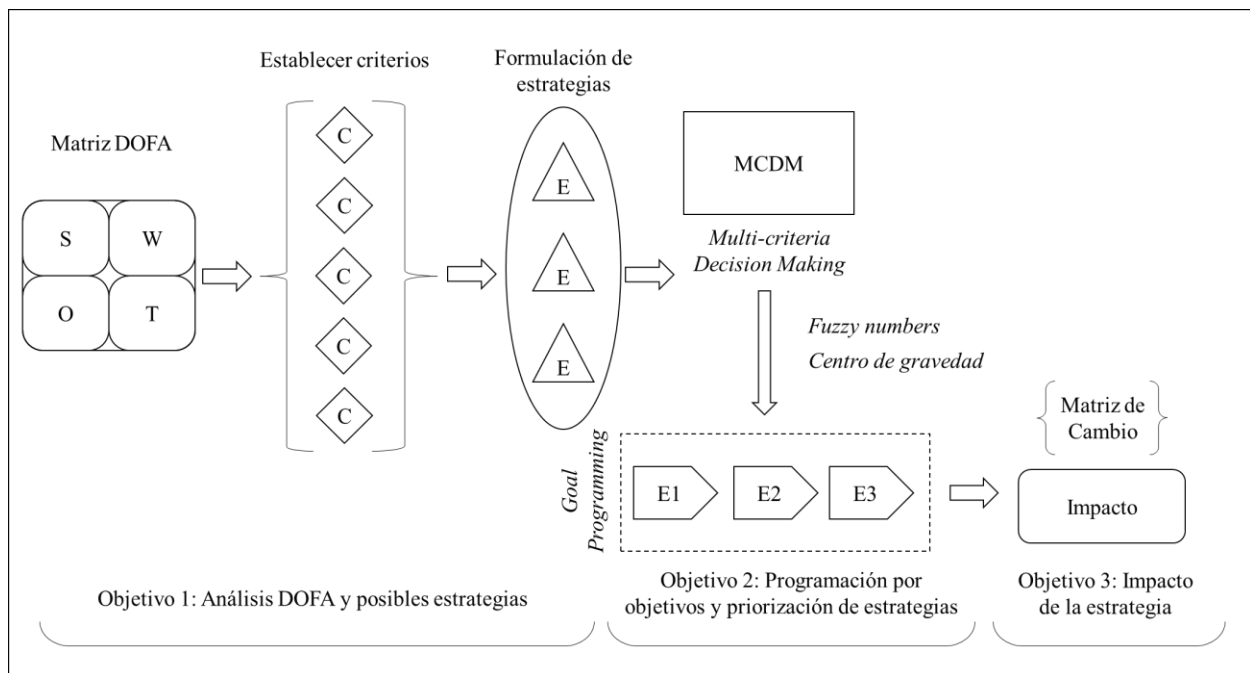


Figura 7. Esquema del desarrollo metodológico. Elaboración propia.

Esta aproximación integral al problema constituye una contribución importante de este trabajo. En la literatura se encontraron aplicaciones separadas de las metodologías mencionadas, como estudios sobre la industria de gas natural en Irán y de energía sostenible en Pakistán. En el caso de Irán, se optó por la programación por objetivos (GP por sus siglas en inglés) y en el caso de Pakistán se realizó un proceso de análisis jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) (Khan I. M., 2018) (Solangia, Tan, Mirjat, & Ali, 2019)

En la literatura se encontraron aplicaciones separadas de las metodologías mencionadas. Pocos autores han integrado el análisis DOFA con GP – *Goal Programming* (Khan I. M., 2018); otros, han recurrido al uso de AHP (Solangia, Tan, Mirjat, & Ali, 2019) (Kajanus, Leskinen, Kurttila, & Kangas, 2012) (Lee & Walsh, 2011), de ANP – *Analytic Network Process* y fuzzy TOPSIS – *fuzzy Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution* (Ervural B. , Zaim, Demirel, Aydin, & Delen, 2018). No se encontraron estudios que integraran las cuatro metodologías objeto del presente análisis.

En las aplicaciones similares ninguna evalúa el impacto, como se pretendió en el presente estudio, por medio de la matriz de cambio que resultó apropiada, puesto que su desarrollo se realiza a partir de procesos existentes para evaluar la dificultad de llegar a los nuevos procesos, a los que apunta el nuevo objetivo o estrategia y se analiza el cambio (Brynjolfsson, Renshaw, & Alstytne, 1997). Y aunque es una metodología que aún no es muy utilizada en estos casos relacionados con energías para el sector transporte, fue útil toda vez que el resultado requirió evaluar la transición al objetivo propuesto de aumentar el consumo de GNCV, teniendo en cuenta que ya se cuentan con algunas prácticas que la industria ha procurado para incentivar su uso.

A partir de una revisión bibliográfica extensa y del conocimiento y experiencia del autor, se hizo un análisis y se construyó una matriz DOFA, cuyos factores permitieron establecer criterios

para formular y evaluar las estrategias propuestas que relacionaron los factores internos con los externos de la industria en Colombia.

Luego, con la aplicación del análisis multicriterio – MCDM, se tuvieron en cuenta las percepciones de expertos de la industria y se emplearon metodologías de números difusos – *fuzzy numbers* – y de centro de gravedad, en un modelo de programación por objetivos – *goal programming* – en el cual, por medio de la optimización de una función objetivo, se escogió la alternativa más viable y se categorizaron las demás.

Por último, se evaluó el impacto de la estrategia seleccionada, por medio de una matriz de cambio. Para esto, se consideraron las interacciones entre la realidad actual que rodea la estrategia formulada y la realidad deseada, que es el objetivo por alcanzar, para aumentar el consumo de GNCV y revertir la tendencia decreciente de los últimos años.

3.1. Etapa 1: Análisis DOFA

La matriz DOFA se construyó a partir de la experiencia y conocimiento aprendido del autor en el sector del GNCV durante los últimos años, y de los resultados de análisis detallados con base en artículos técnicos y de actualidad. En el marco de esa experiencia se tuvo la oportunidad de establecer contacto con varios expertos y otros participantes de la cadena del gas natural, tales como propietarios y gerentes de talleres de conversión y estaciones de servicio, distribuidores y productores de componentes para conversión de vehículos, con quienes se adquirió información de la percepción que tienen de la industria a través de entrevistas semi-estructuradas. También se recurrió a artículos de actualidad en los que otros expertos en economía, estadística, regulación, periodismo, dieron a conocer su opinión sobre el mercado y el problema del consumo de GNCV en Colombia, sobre ellos se pueden mencionar publicaciones tales como informes, estudios

realizados por varias entidades del país, conclusiones de foros del sector con algunas estimaciones del posible futuro del GNCV, datos estadísticos que reflejan las tendencias del consumo de GNCV y la regulación existente que aplica al caso y que podría afectar negativa o positivamente la industria, ellos presentan sus hipótesis sobre como reactivar la industria, lo que está funcionando y lo que se debe mejorar. Con esta información se determinaron las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas que resultaron del ejercicio del presente trabajo.

3.1.1. Formulación de estrategias en el análisis DOFA

Basados en la identificación de los cuatro parámetros DOFA (debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas), la matriz DOFA es aplicada para estimar cuatro tipos de estrategias: FO (fortalezas-oportunidades), DO (debilidades-oportunidades), FA (fortalezas-amenazas) y DA (debilidades-amenazas), como se muestra en la Figura 8 (Khan I. M., 2018).

ESTRATEGIAS DOFA - GNCV

	FORTALEZAS	DEBILIDADES
OPORTUNIDADES	ESTRATEGIAS FO	ESTRATEGIAS DO
AMENAZAS	ESTRATEGIAS FA	ESTRATEGIAS DA

Figura 8. Matriz de estrategias DOFA. Elaboración propia del autor.

Las estrategias FO representan el papel que juegan las fortalezas (internas) de la industria para aprovechar las oportunidades, las estrategias DO representan la utilización de las oportunidades (externas) para compensar las desventajas (internas), FA representan las estrategias que utilizan las fortalezas (internas) para evitar o reducir las amenazas (externas) y DA representa las estrategias que evitan las amenazas (externas) para compensar las desventajas (internas)

(Xingang, Jiaoli, & Bei, 2013). Así, el resultado del análisis DOFA indicó 20 criterios, producto de cinco fortalezas, cinco oportunidades, seis debilidades y cuatro amenazas; a partir de los cuales se formularon tres estrategias FO, tres estrategias FA, tres estrategias DO y dos estrategias DO que se presentan en el siguiente capítulo.

El análisis DOFA permite generar una serie de recomendaciones con potencial para apoyar la expansión de la industria de GNCV en Colombia pero de las cuales se desconocen los efectos de su implementación, y por lo tanto, se hizo necesario complementarla con un análisis multicriterio para que los involucrados y responsables de la toma de decisiones en este campo, puedan escoger la ruta apropiada, y así destinar los recursos y el presupuesto que se requiera, partiendo de una correcta priorización o ranking de las opciones, tal como también lo sugiere Khan (Khan I. M., 2018).

3.2. Etapa 2: Análisis Multi-Criterio (Multi-Criteria Decision Making – MCDM) para formulación de estrategias

Se usó una metodología que permitió orientar la formulación de la estrategia de solución que se busca. Para lo que se realizó un análisis para la toma de decisiones multi-criterio (*Multi-Criteria Decision Making – MCDM*), la cual toma como referencia varias técnicas prácticas, que requieren hacer un juzgamiento y aproximación sobre la contribución de las diferentes opciones a los criterios que se establezcan. Usualmente MCDM provee un sistema de calificación para diferentes factores (Dodgson, Spackman, Pearman, & Phillips, 2009). Así, con el análisis MCDM se determinará la estrategia más adecuada para impulsar el consumo de GNCV en Colombia.

3.3. Etapa 3: Priorización de estrategias. Programación por objetivos – Goal Programming (GP)

El método de programación por objetivos o de metas – *Goal Programming* (GP) es útil para priorizar estrategias, dado que considera variables soporte adicionales que son conocidas como desviaciones y que actúan como “facilitadores” en el proceso de toma de decisiones. Es un método recomendado para problemas de gran escala y es derivado de la programación lineal. Fue identificado como el más apropiado para analizar el caso del consumo de gas natural vehicular en Irán y con el que se logró establecer la propuesta de solución que se buscaba (Khan I. M., 2018).

En este estudio, el modelo de optimización formulado para resolver el *goal programming*, sirvió para hacer el cálculo de la priorización de las estrategias derivadas del análisis DOFA; y a partir de los resultados de análisis de *números difusos* y de técnicas de *centro de gravedad*, se parametrizaron variables en una *función objetivo* – ecuación Eq. (1) – para minimizar las desviaciones que representaron los diferentes criterios establecidos.

Se plantearon restricciones al modelo según las ecuaciones Eq. (2), Eq. (3), Eq. (4), Eq. (5) y Eq. (6), las cuales correspondieron a:

Restricción de *objetivo* – Eq. (2), con la que se evalúan las desviaciones de objetivo g , considerando la calificación de los stakeholders respecto a la magnitud del objetivo.

Restricción *binaria* – Eq. (3) y Eq. (6), con la que se determinó el orden de las alternativas.

Restricción de *desviación* – Eq. (4), con la que establece sólo una desviación, sin importar si esta es superior o inferior.

Restricción de *no negatividad* – Eq. (5), con la que se garantiza que el modelo sólo tuviere en cuenta números positivos.

Con el método de *números difusos* se asignaron valores numéricos a las calificaciones cualitativas que dieron los stakeholders, frente a las estrategias y criterios establecidos, que permitieron formular el modelo de programación de metas y tener el ranking de las alternativas.

El propósito de la técnica de *Centro de Gravedad*, frente a la investigación, fue obtener un promedio de la calificación que dieron los stakeholders a las estrategias y criterios resultantes del análisis DOFA.

La formulación del modelo matemático del cálculo es la siguiente:

Minimizar:

$$\text{Eq. (1)} \quad \text{Función Objetivo} = \sum_{j=1}^n w_j^+ d_j^+ + w_j^- d_j^-$$

Sujeto a:

$$\text{Eq. (2)} \quad \sum_{i=1}^m a_{ij} x_i + d_j^- - d_j^+ = g_j \quad \forall_j$$

$$\text{Eq. (3)} \quad \sum_{i=1}^m x_i = 1$$

$$\text{Eq. (4)} \quad w_j^+ = w_j^- = w_j$$

$$\text{Eq. (5)} \quad d_j^+, d_j^- \geq 0 \quad \forall_j$$

$$\text{Eq. (6)} \quad x_i \in \{0,1\} \quad \forall_j$$

Donde m representa la estrategia a evaluar, n el criterio a considerar, a es la calificación que asignaron los stakeholders, x es la variable de decisión que toma valores de 0 o 1, siendo 1 que se selecciona la estrategia, ya que es la más importante y efectiva, y 0 que se descarta; d son las desviaciones superiores e inferiores que tiene el objetivo, g y w son los pesos normalizados de los criterios DOFA.

3.4. Etapa 4: Matriz de Cambio

Para evaluar el impacto de la implementación de la estrategia seleccionada se diseñó una Matriz de Cambio, en la que se definió una *realidad actual* que rodea el consumo de GNCV y los estímulos que hay para el uso de este combustible, y una *realidad objetivo* que discriminó varias prácticas – *target goals* – relacionadas con el resultado exitoso de la estrategia, sobre la creación de estímulos para el uso de GNCV. Para lo anterior se desarrollaron cuatro etapas y, junto con la opinión de los stakeholders, se analizó la dificultad de la transición y se estimó la factibilidad, secuencia, ubicación y velocidad de los cambios necesarios (Brynjolfsson, Renshaw, & Alstyne, 1997).

Fase 1. En la primera fase se identificaron los conjuntos y situaciones existentes sobre estímulos y resultados de algunas prácticas comerciales que se han desarrollado para la conversión de vehículos. También se consideraron aspectos relacionados con esta parte de la industria para enmarcarlos dentro de una *realidad actual*. Así mismo se estipularon los conjuntos y situaciones deseadas concernientes a una *realidad objetivo*, los cuales harán parte de los resultados que busca obtener la creación de estímulos para el uso de GNCV.

Fase 2. Con las *realidades actual y objetivo* se crearon las matrices de interferencia, horizontal y vertical, en las que se evaluaron las prácticas que se complementan entre sí y se refuerzan, y las que funcionan con propósitos cruzados. Con lo anterior se determinó la estabilidad de cada sistema teniendo en cuenta que los signos positivos (+) significan procesos complementarios y los signos negativos (-) refieren procesos en competencia.

Fase 3. En esta fase se construyó la matriz de transición que combinó las matrices horizontal y vertical, para determinar el grado de dificultad estimado para el cambio que podrían presentar las situaciones existentes (*realidad actual*) hacia las situaciones deseadas (*realidad objetivo*).

Igualmente, con signos positivos (+) para indicar que la transición sería fácil, mientras que con signos negativos (-) que sería difícil.

Fase 4. La última fase consistió en revisar la posición y opinión de los interesados y, considerando las encuestas realizadas a los stakeholders, se estableció la importancia que ellos le dieron a cada uno de los procesos de la Matriz de Cambio. Dicha importancia se evaluó a través de una escala *Likert* simple de cinco puntos (de “-2” a “+2”), en la que un valor de "+2" significa que una práctica es extremadamente importante, un valor de "+1" que una práctica es importante pero no esencial, un valor de "-2" indica un fuerte deseo de cambiar o rechazar y un valor de "0" indica que se puede omitir o que representa indiferencia.

Finalmente se analizó la matriz y se concluyó sobre la factibilidad, la transición, la secuencia de ejecución, la ubicación y el ritmo con el cual se deberá hacer el cambio.

A partir de la metodología tratada en este capítulo se obtuvieron los resultados que se muestran en las secciones posteriores. La consulta bibliográfica fue la base para consolidar la matriz DOFA y la formulación de las estrategias para dar solución a la problemática, y con el análisis multicriterio se consideró la opinión de expertos para ejecutar el modelo de programación por objetivos que indica cual debe ser la estrategia a implementar. Por último, a través de una matriz de cambio se evaluó el impacto sobre el consumo que tendría la implementación de la estrategia seleccionada.

4. RESULTADOS

El análisis DOFA permitió plantear posibles estrategias para revertir la tendencia decreciente del consumo de GNCV en Colombia. La más apropiada para implementación en el contexto colombiano fue seleccionada con la participación de 14 expertos involucrados (ver Anexo C) en la industria del gas natural, quienes, a través de un análisis multicriterio, calificaron y validaron las estrategias formuladas. Finalmente, se parametrizó un modelo matemático que indicó la priorización de las estrategias planteadas, determinando así la primera que se debería implementar para lograr el objetivo.

4.1. Etapa 1: Análisis DOFA

4.1.1. Matriz DOFA

El consolidado de criterios o factores internos y externos se ilustra en la Figura 9:

DOFA COLOMBIA - GNCV	
FORTALEZAS Infraestructura desarrollada en el país Bajo precio del GNCV Menos emisión de gases efecto invernadero y material particulado El mantenimiento de vehículos convertidos es más fácil Capacidad para generar empleos calificados	OPORTUNIDADES Compromiso del país con la COP 21 y mejoramiento de la calidad del aire El aprovechamiento y explotación de nuevos yacimientos Importación de gas natural licuado Aumento del tamaño y renovación del parque automotor de GNCV Adopción de programas de subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos
DEBILIDADES Nivel de reservas probadas de gas natural Suministro de componentes para la conversión de vehículos Incertidumbre en el comportamiento del precio de los combustibles Ausencia de políticas públicas que estimulen el consumo de GNCV Pérdida de potencia de los vehículos convertidos Procesos de certificación de vehículos y revisiones periódicas	AMENAZAS Regulación del precio de producción del gas natural Disminución de las actividades de exploración Incumplimiento de las normas y regulaciones del país Limitaciones en la capacidad operativa para la vigilancia y el control Surgimiento de otras energías alternativas para el transporte

Figura 9. Matriz DOFA GNCV en Colombia. Elaboración propia.

4.1.1.1 Fortalezas

i. Infraestructura desarrollada en el país.

La primera fortaleza del mercado de GNCV en Colombia está relacionada con la infraestructura que tiene el país, la cual cuenta con la capacidad de producción de 1.078 MPCD

(Millones de Pies Cúbicos Diarios) yatiende el consumo de 1.067 MPCD en los sectores residencial, industrial y vehicular. Se cuenta con reservas probadas de 4.400 GPC (Giga Pies Cúbicos) y recursos potenciales para obtener 5.400 GPC (Transportadora de Gas del Interior, 2018). Así las cosas, con estas reservas y la infraestructura existente, se podría asegurar el abastecimiento de gas para 15 años, teniendo en cuenta la relación reserva-producción que señala Eric Flesch, presidente de Promigas (Heidy, 2018).

Al revisar los datos de las transportadoras de gas que hay en Colombia, solamente la Sociedad PROMIGAS S.A. E.S.P transporta el 52 % del gas natural del país a través de 3.089 km de redes, que representan alrededor del 38% de los gasoductos que existen, manteniendo niveles de disponibilidad y confiabilidad del servicio en 100% y de continuidad del servicio de transporte en un 99,99% (Promigas, 2018). La Tabla 6 muestra el comparativo de las empresas filiales de PROMIGAS y sus capacidades.

Tabla 6. Principales transportadoras de gas de Colombia. (Promigas, 2018).

	Longitud del gasoducto (km)	Volumen transportado (Mpcd)	Capacidad máxima (Mpcd)
PROMIGAS	2.556	331,4	738
TRANSMETANO	189	51,4	77,6
PROMIORIENTE	333	64,7**	85,8***
TRANSOCCIDENTE	11	44,5	73,6

**Volumen transportado Gibraltar - Bucaramanga: 31,4 Mpcd. Volumen transportado Barrancabermeja - Payoa - Bucaramanga: 27,0 Mpcd

***Capacidad máxima Gibraltar - Bucaramanga: 49,9Mpcd. Capacidad máxima Barrancabermeja - Payoa - Bucaramanga: 36,2 Mpcd

Por su parte, la TRANSPORTADORA DE GAS DEL INTERIOR – TGI aporta a la infraestructura con una red de gasoductos de 4.000 km, compuesta por tres gasoductos principales a los que se le conectan ramales regionales para transportar gas a otros lugares más retirados (Transportadora de Gas del Interior, 2018). La Figura 10 muestra el mapa de la red de gas natural con que cuenta Colombia.

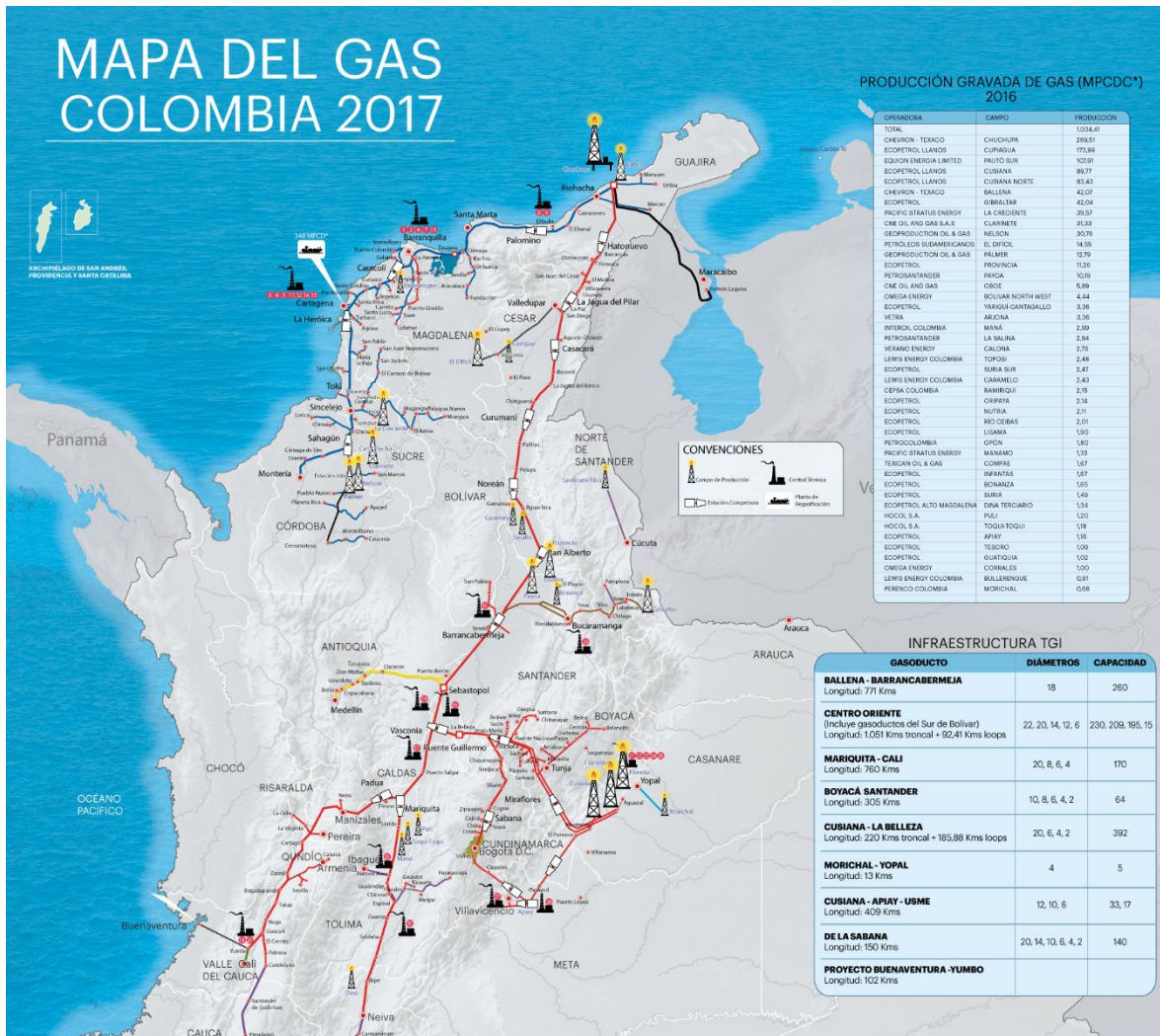


Figura 10. Mapa de la red de gas en Colombia. (Transportadora de Gas del Interior, 2018).

Así, la red de gasoductos con que cuenta el país, evidencia la buena infraestructura que se tiene y permite establecer que en el aspecto técnico o tecnológico hay un desarrollo importante que se podría seguir explotando en pro de la producción y distribución de gas natural, lo que significa una fortaleza que ayudará a generar estrategias encaminadas al perfeccionamiento de la industria y que impulsen el consumo de GNCV.

Adicional a esta infraestructura que se tiene para producción y distribución por redes, también es importante tener en cuenta la capacidad con la que se cuenta para suministro GNCV a los vehículos que usan este combustible y talleres de conversión de vehículos, teniendo en cuenta que

tienen un rol relevante puesto que de ellos depende que los usuarios puedan acceder a tener vehículos a GNCV y como adquirir el servicio, y en este aspecto también se tienen números interesantes. Según el módulo de GNCV del Sistema de Información de Combustibles (SICOM-GNCV), a marzo de 2020 hay registrados alrededor de 760 estaciones de suministro y más de 200 talleres para conversión de vehículos, a nivel nacional.

ii. Bajo precio de GNCV.

Este es el factor más determinante para estimular el uso de GNCV, dada la diferencia significativa y favorable respecto a los combustibles tradicionales como la gasolina o el diésel; el bajo precio del GNCV constituye una de las mayores fortalezas para la industria, y tal como se señaló en la sección 2.1.4.2, se evidencian beneficios económicos, representados en ahorros en combustible para los usuarios de GNCV que instalan el equipo en sus vehículos, a cambio de gasolina o diésel.

Lo anterior se reafirma con datos sobre la conversión de vehículos a GNCV, los cuales indican que estas crecieron de 12.081 vehículos convertidos en 2017 a 15.424 en 2018 (Concentra, 2020), es decir un incremento del 131% a mayo de 2018 como resultado del incremento del precio del galón de gasolina, puesto que se amplió la diferencia con el precio de venta del GNCV, seguido de otros factores como renovaciones de flotas de empresas y servicio público e incentivos al precio final de la instalación trasladados a los clientes, según informó la empresa Gas Natural, hoy Vanti S.A. E.S.P, a través del Diario El Espectador (Diario El Espectador, 2018).

En términos energéticos, el ahorro del GNCV comparado con el de la gasolina se puede establecer según el poder calorífico que tiene cada uno de los combustibles de 116.159 BTU/Galón para la gasolina y 33.791,76 BTU/m³ para el gas natural (UPME, 2020), así:

Se establece una relación de equivalencia entre ambos combustibles de 3,44:

$$F_{eq} = \frac{116.159 \text{ BTU/Galón}}{33.791,76 \text{ BTU/m}^3} = 3,44$$

Según precios promedio a febrero de 2020 de \$9.500 por galón de gasolina y de \$1.623 por m³ de GNCV (MinMinas, 2020), se calcula un porcentaje de ahorro del 41,2%, así:

$$\% \text{ de ahorro} = \frac{\$9.500 - 3,44 * \$1.623}{\$9.500} = 41,2\%$$

El cálculo anterior ratifica el ahorro que pueden tener los usuarios de gas natural como combustible en sus vehículos y en consecuencia, se puede concluir que el bajo precio de venta de GNCV, se puede configurar como un estímulo para que los usuarios opten por usar este combustible, y de mantenerse así el comportamiento de los precios, tanto de combustibles líquidos como de GNCV, podrán ser más los consumidores que se vinculen a esta industria y se reafirma la consideración que el bajo precio del GNCV es una fortaleza para aumentar el consumo.

iii. El GNCV es emisor de una menor cantidad de gases efecto invernadero y de material particulado.

En el aspecto ambiental, el hecho de que el GNCV emita menor cantidad de gases efecto invernadero y de material particulado que contribuye a la buena calidad del aire, es un factor relevante y por ello se puede establecer como una fortaleza. Se han realizado estudios que demuestran que los vehículos que funcionan con este combustible reducen en un porcentaje cercano al 29% la emisión de gases de efecto invernadero comparados con aquellos que funcionan con gasolina, en tanto que dicha reducción se aproxima al 22% si se compara con los gases de efecto invernadero generados por los autos diésel (Imran Khan, Yasmin, & Shakoore, 2015).

Respecto a los efectos sobre la calidad del aire, la emisión de material particulado debida a la combustión del GNCV implica reducciones de entre el 96% y 98% si se compara con otros

combustibles, como se evidenció en un estudio comparativo de emisiones entre gas natural, gasolina y diésel en China (Wang, Xing, Xu, & Du, 2016).

Un estudio sobre las implicaciones ambientales de usar gas natural como combustible vehicular señala que para reducir las emisiones de gases efecto invernadero de los vehículos a GNCV incluyen la mejora en el ahorro de combustible y la mitigación de las fugas de metano asociadas con la cadena de suministro de gas natural. Por lo tanto, se necesita investigación sobre la ubicación de estas emisiones para comprender completamente el potencial de los vehículos a GNCV en la mejora de la calidad del aire y su impacto en la población (Cai, Burnham, Chen, & Wang, 2017).

En ese sentido, el contexto del cambio climático, las necesidades y pactos globales en materia ambiental han hecho perentorio que las nuevas iniciativas, sobre todo en cuanto a desarrollos tecnológicos se refiere, contribuyan con la mitigación de los efectos ambientales que puedan ocasionar. En lo relacionado con este estudio, se reafirma una fortaleza del consumo de GNCV.

iv. El mantenimiento de vehículos que usan GNCV es más fácil.

El aspecto mecánico es un tema relevante, particularmente porque en la conversión de vehículos los sistemas de funcionamiento se intervienen para habilitar su funcionamiento con GNCV. En este estudio se encontró que mecánicamente hay ventajas para los vehículos que usan GNCV y se puede determinar una fortaleza en lo concerniente con el mantenimiento, dado que con el gas se presenta una combustión más completa que ofrece mejores condiciones de limpieza al motor y al funcionamiento general de las piezas. De esta manera, se benefician los motores con el uso de gas natural, debido al menor desgaste de piezas internas, menos actividades de mantenimiento, mayor vida útil del motor, el aceite y las bujías (Imran Khan, Yasmin, & Shakoor, 2015) (GasExpress Vehicular, 2017).

Un ejemplo a referir en este aspecto es el caso Tokyo, dónde se definieron factores relevantes para la introducción de vehículos a GNCV, y uno refiere a la operación y el mantenimiento de los autobuses de GNCV. Inicialmente, la confiabilidad de las piezas utilizadas en estos autobuses no era alta, lo que requería reparaciones frecuentes y derivaba en altos costos. Este problema mejoró a través de la cooperación e intercambio de información con los fabricantes de automóviles. Y, a medida que se modificaron las normas relativas a la seguridad del tratamiento de gases a alta presión, los procedimientos para la inspección de los tanques de combustible se simplificaron, reduciendo así el costo de mantenimiento de los autobuses de GNC. Adicionalmente el Consejo Estratégico solicitó a los fabricantes de vehículos que adoptaran varias medidas para promover la introducción de vehículos con GNC, y entre ellas eran que se debía mejorar los sistemas de mantenimiento e inspección para vehículos a GNCV (Yarime, 2009). Así, como resultó en este caso, el mantenimiento en los autobuses a GNCV se convirtió en una fortaleza para el uso de dicho combustible.

Dado lo anterior, esta es fortaleza acerca del mantenimiento en vehículos a GNCV es algo que podría estimular a potenciales usuarios que no lo usan a que lo hagan y por lo tanto se puede considerar dentro de las estrategias que se formulen para incrementar el consumo.

v. Capacidad para generar empleos calificados.

La industria del GNCV en Colombia demanda personal calificado para la ejecución de las diferentes tareas que se requieren, como la conversión de los vehículos, el suministro de gas en las estaciones de servicio, la operación y mantenimiento de los equipos para el suministro, las inspecciones y certificaciones en talleres y estaciones, entre otras.

La regulación, los reglamentos técnicos aplicables a talleres y procesos de conversión (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2012) y a estaciones de suministro de gas

(Ministerio de Minas y Energía, 2017), exige que se cuente con el personal calificado para dichas labores, que a su vez debe estar debidamente certificado por el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) o por un Organismo Certificador de Personas, acreditado por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia – ONAC. El propósito de estas exigencias no es otro que el de garantizar que esas labores se hagan de manera confiable y segura, que un automóvil con equipo de GNCV instalado funcione correctamente y no atente contra la integridad de los usuarios si llegase a fallar, y que al momento de suministrar el gas a los vehículos no ocurran accidentes que puedan ser fatales, entre otros. Todos estos son riesgos que se mitigan con el hecho de tener personal calificado para la realización de las tareas.

Así, la capacidad para generar empleos calificados se configura como una fortaleza para el consumo de GNCV, pues se está obligando a las empresas involucradas en el sector a contar con personas competentes y debidamente certificadas en la operación, lo que deriva en calidad para la industria y confianza para los usuarios que utilizarán el servicio, quienes finalmente aumentarán la demanda.

4.1.1.2 Oportunidades

i. Compromiso con el Acuerdo de París – COP 21 y mejoramiento de la calidad del aire.

Las oportunidades para el consumo de GNCV en Colombia desde el punto de vista ambiental, se enfocan en ayudar a mitigar las afectaciones del cambio climático, para lo cual el país se comprometió a tomar acciones nacionales de cara a la COP21 (Organización de las Naciones Unidas, 2015), y a abordar la problemática del cambio climático de la forma más balanceada posible, incluyendo la mitigación, la adaptación y los medios de implementación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Para los compromisos del Estado Colombiano en la COP21, el sector del gas natural vehicular podría ser uno de los principales actores a contribuir en el proceso de transición energética y descarbonización del sector energético, mediante la sustitución de líquidos por gas en la movilización de pasajeros y carga. En concordancia con estos pactos, proyecciones de la UPME estiman que, con la implementación de las acciones para cumplirlos, se logrará un aumento de la demanda de 87 GBTUD en 2015 a 135 GBTUD en 2029. (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2016).

Adicionalmente, dentro de las acciones para el mejoramiento de la calidad del aire es importante incluir el ajuste en la regulación sobre niveles de emisiones contaminantes de gases efecto invernadero, para que las exigencias en esta materia que se tienen establecidas como país sean más rigurosas. Desde el año 2008 ya se habían establecido normas de emisión para vehículos automotores activados con gasolina y diésel (ACPM), con el propósito de proteger el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud de la población en general. La Resolución No. 910 de 2008 del Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, estableció los niveles máximos permisibles de emisión de gases contaminantes que debían cumplir las fuentes móviles terrestres (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2008). Conforme a lo anterior, en el año 2018, por medio del documento CONPES, se formularon acciones para reducir la concentración de contaminación en el aire y proteger así la salud y el ambiente (Departamento de Planeación Nacional, 2018).

En ese orden de ideas, hay acciones nacionales para mejorar la calidad del aire que incluyen las exigencias regulatorias sobre los niveles máximos de emisiones contaminantes por parte de vehículos automotores o fuentes móviles, y para cumplir el compromiso con la COP 21, donde las

bajas emisiones que genera el GNCV juegan un papel fundamental, dándose la oportunidad para el uso de este combustible y por ende el incremento de su consumo.

ii. El aprovechamiento y explotación de nuevos yacimientos.

En Colombia se han encontrado nuevos yacimientos de gas natural, y de continuar con la actividad exploratoria seguramente nuevas proyecciones indicarían que su número aumentará, lo cual constituye una oportunidad significativa para su explotación.

Se han dado resultados como el descubrimiento de presencia de gas en dos lugares del pozo exploratorio Gorgon-1, que sumados a los hallazgos de Kronos-1 y Purple Angel-1, confirmarían una provincia gasífera en aguas profundas, entre 3.675 y 4.415 metros de profundidad, del Caribe Colombiano. En la Figura 11 se puede observar la profundidad de estos pozos en el sur del mar caribe (Ecopetrol, 2017).



Figura 11. Infografía de los pozos Gorgon-1, Kronos-1 y Purple Angel-1. (Ecopetrol, 2017).

De acuerdo con Orlando Cabrales Segovia, Presidente de la Asociación Colombiana de Gas Natural – Naturgas, si bien no hay que anticiparse a los resultados, y se debe esperar a los análisis para establecer el verdadero potencial de los yacimientos, es claro que en el Mar Caribe existe un potencial importante de este combustible (Portafolio, 2017).

A esta oportunidad se le suma el hecho de que Colombia dispone de reservas de gas natural hasta 2025, lo que no debe impedir que se siga fomentando la exploración de nuevos yacimientos en el territorio del país (Agencia EFE, 2017). Se trata del aprovechamiento de los recursos del país, específicamente de energéticos, porque seguramente se van a seguir encontrando más fuentes de gas natural que han de aprovechar y explotar, lo que contribuirá a la disponibilidad para el consumo que se busca aumentar.

iii. Importación de Gas Natural Licuado GNL.

Si bien está la oportunidad de contar con las reservas y recursos de gas natural propias, también se puede aumentar la disponibilidad para el país por medio de la importación de gas natural. Es de considerar que Colombia está en el puesto 49 de la lista de países con reservas probadas de gas natural, y entre los países con importaciones ocupa el puesto 126 con cero metros cúbicos importados a enero de 2018; mientras que países con menores reservas como Japón (puesto 74) o Alemania (puesto 65), son los mayores importadores de gas natural, con 114 Mil millones y 102 Mil millones de metros cúbicos respectivamente (CIA World Factbook, 2018). Lo anterior permite inferir que, así como países que cuentan con bajas reservas se han convertido en los principales importadores de gas natural en el mundo, para Colombia también puede darse la oportunidad de importar el hidrocarburo.

Es decir que, si las reservas de gas natural no fueran suficientes, se podría importar GNL, estableciéndola como una de las soluciones viables para mantener la continuidad en la prestación

del servicio, y así garantizar el abastecimiento, mientras el país recupera sus niveles de competitividad y robustez para la atracción de inversiones que permitan materializar los esfuerzos en reservas de hidrocarburos. En las actuales circunstancias, resulta necesario admitir como fuente de suministro el GNL, para que respalde la dinámica del mercado interno (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2016).

También se puede considerar que se cuenta con una interconexión por gasoducto con Venezuela de 500 MPCD, la cual podría verse como alternativa de importación en el mediano plazo si las relaciones diplomáticas y comerciales con el país mejoran, y que Colombia ya se ha integrado paulatinamente al mercado internacional de GNL, por medio de la planta de regasificación de 400 MPCD ubicada en la Costa Atlántica, que entró en operación desde 2017 (Transportadora de Gas del Interior, 2018).

Ahora bien, la importación de GNL señala también que se requiere la construcción de nuevas *plantas regasificadoras*, pues son necesarias para recibir el GNL importado y enviarlo a la red nacional de distribución. Para esto, el Gobierno Nacional, a través de la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, reiteró la necesidad de construir una planta de regasificación en Buenaventura, luego de analizar los posibles escenarios de incorporación de nuevos recursos en los próximos años, y el balance de gas natural para el periodo 2018-2027 (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2018).

Es así como la importación de gas natural se convierte en una oportunidad para aumentar la disponibilidad del país, que atienda los incrementos en la demanda que se esperarían, pues como se señala en la sección 4.1.1.3, una de las debilidades de Colombia es el bajo nivel de reservas y podrían ser insuficientes. Es oportunidad que se complementa con la fortaleza de la infraestructura

desarrollada que hay, pues se requerirá del uso de plantas de regasificación y de la red de gasoductos para la distribución.

iv. Aumento del tamaño y renovación del parque automotor que funciona con GNCV.

Para que el consumo de GNCV revierta la tendencia decreciente y aumente, sería ideal que todo el parque automotor que actualmente hay en el país y el que ruede en tiempos posteriores, funcionen con GNCV, tanto vehículos particulares como de servicio público, de transporte masivo urbano e intermunicipal e inclusive los de carga. Pero la realidad es que el gas natural no es ni será la única fuente de energía para la movilidad de vehículos y que las reservas de gas natural en Colombia son limitadas al igual que la disponibilidad para atender la demanda del sector transporte, según la UPME a 2013 se contaba con 6.41 TPC (Terapias cúbicas) de reservas y se estima que para apenas se contará con 2 TPC (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2015), de las cuales tan solo el 14% estaría disponible para uso vehicular (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2016). Pero por otro lado el parque automotor si crecerá o se renovará, lo cual abre la oportunidad que en ese nuevo parque haya más automotores funcionando con GNCV y en ese sentido será necesario crear los estímulos necesarios para que esto se dé.

Es de tener presente que el problema planteado en este estudio surgió de la desaceleración que ha tenido la conversión de vehículos que cayó un 21% entre 2012 y 2016, mostrando una tendencia del parque automotor de vehículos que funcionan a GNCV, que al cierre de 2016 presentó un 47% de vehículos activos contra el 53% de vehículos a los cuales se les venció la conversión y no hicieron renovación (Concentra - Inteligencia en Energía, 2018).

Por lo tanto, se abre la oportunidad para que, con la formulación de las estrategias apropiadas, más vehículos se conviertan, se utilicen más vehículos dedicados y con políticas de renovación de las flotas que constituyen el transporte público, se estimule el transporte masivo con GNCV,

buscando que este sea el combustible para esos vehículos que suelen tener mayor circulación. Así lo concluye un estudio de la Universidad de los Andes sobre la conveniencia del gas natural en Colombia (Universidad de los Andes, 2016). Y finalmente se pueden incluir los vehículos de carga, que en la actualidad apenas superan las 150 unidades dedicadas (Promigas, 2018), de las 300.000 que hay en total en el territorio nacional (Ministerio de Transporte, 2019).

Dado lo anterior, se permite advertir que un mayor parque automotor que funcione con GNCV reflejará también beneficios económicos, ambientales y de salud. En Bogotá, por ejemplo, cerca de diez mil buses que reemplacen los vehículos diésel por nuevos vehículos a GNCV representan un ahorro de \$220.000 millones de pesos, una reducción de 11,7 millones de toneladas de CO₂ y de 6.000 toneladas de material particulado (Universidad de los Andes, 2016). En ciudades como Cartagena y Medellín, entre 2018 y 2021, con 16.000 microbuses, 15.000 buses y 1.400 articulados que operarán con GNCV, se lograrán ahorros en el transporte y la salud de 13,5 billones de pesos durante 20 años (Asociación Colombiana de Gas Natural, 2018).

Y al final, este aumento del parque automotor de vehículos a GNCV derivará en el incremento del consumo de gas natural, ya sea con automóviles convertidos, dedicados³, de transporte masivo, flota intermunicipal e inclusive de carga.

v. Adopción de programas de subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos.

Históricamente, varias empresas del gremio del GNCV se han unido para incentivar el uso de este combustible por parte de los usuarios potenciales. Empresas como Gas Natural Fenosa, Ecopetrol, TGI, estaciones de servicio de suministro de gas y talleres que pertenecieron al programa de calidad y responsabilidad social de Gas natural Fenosa, han hecho aportes para que

³ Los vehículos dedicados son aquellos que funcionan únicamente con gas natural. (ICONTEC, 2018).

los usuarios accedan a subsidios en el pago de la instalación de equipos de GNCV en sus automotores, para esto desde 2014 se creó un *Fondo conjunto de Conversiones* para la promoción del uso del Gas Natural Vehicular, por más de \$40.000 millones, con la finalidad de promocionar en el cliente final el uso del producto mediante el otorgamiento de incentivos que reducen el valor final de la instalación del vehículo (Grupo Vanti, 2017). En 2019, se firmó un nuevo acuerdo con los actores de la cadena del GNCV para la masificación del uso del GNV en Bogotá y su zona de influencia, con vigencia a 2021 (Grupo Vanti, 2019). Además, Gas Natural Fenosa ha financiado la conversión con el recibo de gas domiciliario.

Pero no sólo se esperaba que vehículos particulares se convirtieran; TGI, Ecopetrol y Gas Natural Fenosa también firmaron un convenio para incentivar el uso de GNCV en vehículos de transporte masivo de Bogotá y otros vehículos dedicados (TGI; Ecopetrol; Fenosa, 2017).

Aunque el Gobierno, ha estado alejado de estas iniciativas para la conversión de vehículos en el país, ha intervenido puntualmente para facilitar la importación de vehículos dedicados a GNCV. Se han creado exenciones del impuesto del IVA, un arancel especial del 5% si se importan de países diferentes a EE.UU. y México, y una deducción de hasta el 100% de la inversión de la base gravable del impuesto de renta y beneficio neto que puede llegar hasta el 25% de la inversión (PROMIGAS, 2017).

Así, se evidencia que iniciativas previas para promover el consumo de GNCV lideradas por el sector privado han funcionado y servirían como ejemplo para que desde el Gobierno Nacional se implementen políticas y directrices especiales que estimulen más la conversión de vehículos, siendo ésta una oportunidad para aumentar el consumo de gas natural que, a su vez, se complementa con la de incrementar el parque automotor de vehículos a GNCV que se trató previamente.

4.1.1.3 Debilidades

i. Nivel de reservas probadas de gas natural.

Una debilidad para el consumo de GNCV en Colombia está en las reservas limitadas de gas natural, puesto que el país apenas cuenta con 0,11 MMm³ (Millones de metros cúbicos) de existencias. Las cifras a nivel global indican que el Medio Oriente y la antigua Unión Soviética son responsables del 67,3% del total de las reservas mundiales de gas natural; Europa, Euroasia y el Continente Americano responden por el 16,9%; y en América Latina, los números son de 7,11 billones de metros cúbicos, equivalente a un poco más del 3,9%. La mayor parte de las reservas regionales de gas natural se encuentra en Venezuela (4.35 MMm³), seguido de Bolivia (0,5 MMm³) y Argentina (0,34 MMm³), mientras que países como Trinidad y Tobago y Perú cuentan con reservas de 0,5 MMm³ y 0,25 MMm³, respectivamente (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2007).

Además del bajo nivel de las reservas de gas en el país, la disponibilidad que se tiene sobre las mismas para atender la demanda es limitada, es decir, que gran parte del gas de las reservas se usa para la operación de procesamiento y no significa que todo el volumen de gas esté disponible para uso vehicular. En ese sentido, el 14% del volumen total corresponde a gas de operación, el 8% está comprometido con las refinerías y el 62% está comprometido mediante contratos de suministro firmes o que garanticen firmeza para el propio consumo (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2016). El panorama sobre estas reservas, según el Ministerio de Minas y Energía, muestra que redujeron su vida útil de 9,8 años a 8,1 (Ministerio de Minas y Energía, 2020).

El Plan Transitorio de Abastecimiento de Gas Natural (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2016), indica que los descubrimientos de campos pequeños y la reducción de reservas impactan negativamente la percepción de prospectiva del país, al tiempo que la actividad

exploratoria ha disminuido de forma acelerada, principalmente por los bajos precios de los hidrocarburos y la crisis que se desató en las grandes empresas petroleras ante la coyuntura de precios. De acuerdo con estudios sobre la seguridad para el suministro de gas natural en Colombia, se requiere tomar medidas, dado que el suministro se está viendo comprometido porque no se han encontrado reservas significativas en los últimos diez años (Saldarriaga-C & Salazar, 2016).

Esta es una debilidad que se debe tener muy presente porque si al comparar con otros países se resalta que Colombia tiene bajo potencial de reservas de gas natural, que además no se encuentran reservas significativas, y de las pocas que hay no todas pueden ser para usos vehiculares exclusivamente. Así, si una estrategia logra estimular el consumo de GNCV, se deberá garantizar que se cuenta con disponibilidad de gas natural para atender esa demanda y si el nivel de reservas probadas es bajo, sería uno de los sectores afectados directamente por desabastecimiento.

ii. Colombia no es fabricante de componentes para la conversión de vehículos.

En Colombia casi no se fabrican los equipos de GNCV que se instalan en los vehículos para convertirlos a funcionar con este combustible. Según experiencia propia del autor, en el marco de la vigilancia y control de la Superintendencia de Industria y Comercio, y específicamente en lo relacionado con la industria de GNCV, por medio de los registros de importación que se tramitan en la Ventanilla Única de Comercio Exterior (VUCE), y las actuaciones de verificación de los reglamentos técnicos relacionados, se ha observado que la gran mayoría de los equipos para convertir vehículos y para la operación de estaciones de suministro, son importados.

Dado lo anterior, se infiere que Colombia no tiene desarrollada la tecnología apropiada para la fabricación de componentes para la conversión de vehículos a GNCV, mucho menos para la operación de estaciones de suministro y por ende, para atender el desarrollo del mercado se debe recurrir a la importación de los productos. Esto genera costos adicionales que se ven reflejados en

las conversiones y el funcionamiento de las estaciones, y se configura una debilidad dado que ello impide que se realicen conversiones y comercialización de GNCV más económicos, impidiendo que la tendencia de consumo de gas natural aumente.

iii. Incertidumbre en el comportamiento del precio de los combustibles.

Conforme se anotó en la sección 4.1.1.1, una de las fortalezas del consumo de GNCV es su precio de venta, más bajo que el de la gasolina o el diésel, favorece el uso de GNCV. No obstante, este precio está vinculado a los precios de los combustibles líquidos sustitutos, sujetos a fluctuaciones que constituyen una debilidad para la industria.

Si bien el precio del GNCV es bajo, en los últimos años ha venido al alza debido que el gas natural en *boca de pozo*⁴ está dolarizado, ya que se requiere mantener las inversiones en materia de exploración y explotación, según indicó Eduardo Pizano, Expresidente de Naturgas. Pizano manifestó que la regla que se tiene en Colombia es que ese valor en dólares se pasa directamente a la tarifa (Diario El Nuevo Siglo, 2015). Como consecuencia, la amplia brecha en los precios de los combustibles se ha reducido, conforme a la evolución de los precios de venta al público.

Igualmente, es preciso señalar que los precios de los combustibles sustitutos, tales como el ACPM y la gasolina, afectan directamente y de manera positiva el consumo y la penetración del GNCV. En el último año la conversión de vehículos a gas aumentó su tasa, por esto, resulta interesante analizar el comportamiento del precio de los combustibles en este último periodo. En la Figura 12 se puede ver la tendencia del GNCV que se ha mantenido constante en un precio bajo mientras que el precio de la gasolina y el ACPM ha estado al alza, lo que permite estimar que la

⁴ Punto de Entrada (Boca de pozo): Punto en el cual el Remitente entrega físicamente Gas Natural al Sistema Nacional de Transporte y el Transportador asume la custodia del Gas. El Punto de Entrada incluye la válvula de conexión y la “T” u otro accesorio de derivación (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2000).

brecha se hizo amplia nuevamente, y por ende el uso de GNCV reflejado en más conversiones de vehículos, aumentó.

Por su parte, la Asociación Colombiana de Gas Natural – Naturgas – anunció los precios en los que se comercializa el gas natural vehicular, e informó que mientras el precio de la gasolina ha subido a niveles históricos, el precio del gas natural vehicular ha mantenido una estabilidad en los últimos meses logrando mejorar su competitividad frente a otros combustibles (Asociación Colombiana de Gas Natural - Naturgas, 2018).

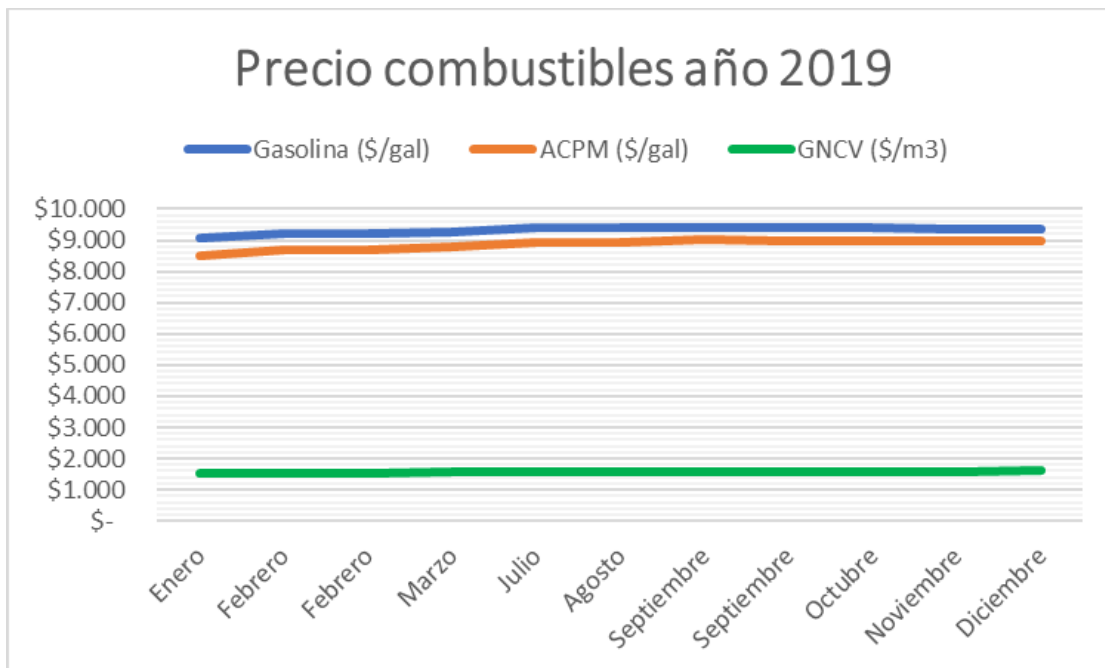


Figura 12. Tendencia de los precios de los combustibles en Colombia durante el año 2018. Elaboración propia del autor con base en datos del Ministerio de Minas y Energía (Ministerio de Minas y Energía, 2020) (Ministerio de Minas y Energía, 2020).

Según los expertos, el alza de los precios internacionales del petróleo se debe a las sanciones de Estados Unidos impuestas a Irán, y por ende su presunta salida del mercado internacional, y a la crisis de Venezuela (Concentra, 2018).

iv. Ausencia de políticas públicas que estimulen el consumo de GNCV.

De acuerdo con las conclusiones del último foro sobre gas natural realizados por la revista *Semana y Naturgas*, hay conciencia y a la vez preocupación porque para el sector hacen falta políticas públicas que incentiven el uso del GNCV (*Revista Semana & Asociación Nacional de Gas Natural - Naturgas*, 2017). La experiencia de países como Irán e India, específicamente en su capital Delhi, demuestran que el apoyo del gobierno es necesario para el estímulo del uso de este combustible. Mientras que en Irán, un estudio reciente concluyó que la estrategia más efectiva para promover el crecimiento de la industria de GNCV es que el desarrollo de esta sea una prioridad, acompañada de subsidios e incentivos (Khan I. M., 2018), en Delhi, la Corte Suprema ordenó al Gobierno mejorar la calidad del aire, reduciendo la polución vehicular, por medio de directivas como que los buses de más de 8 años de vida sólo podrían funcionar con GNCV u otros combustibles limpios y que la autoridad del gas aumentara los puntos de suministro (Goyal & Sidhartha, 2003). En los dos casos la voluntad política, expresada en políticas específicas, dio un impulso importante al sector y benefició tanto a productores y comercializadores de la tecnología como a los consumidores de GNVC.

Así, se hace necesario propiciar que haya un esfuerzo colectivo en pro de materializar las ventajas del GNCV, reducir las emisiones contaminantes en el aire, aprovechar la tecnología disponible, modernizar las flotas de servicio de transporte público, cómo lo ha hecho Transmilenio que incorporó una flota de 741 buses a GNCV recientemente (RTVC, 2020), e incentivar la utilización de alternativas limpias de movilidad; son temas que no se puede dejar sólo a los transportadores. Hay casos de mostrar sobre el uso de GNCV en la movilidad, como Cali y Medellín, donde la voluntad política ha sido más evidente, ya que allí se han hecho avances significativos en sistemas integrados de transporte con uso exclusivo de gas natural, sin embargo,

se trata de un proceso a largo plazo que debe incluir congresistas, ministros, alcaldes, gobernadores y concejales (Revista Semana & Asociación Nacional de Gas Natural - Naturgas, 2017).

En materia de políticas públicas Colombia ha tenido avances como el ‘carbon tax’⁵. Sin embargo, se debería pensar en otras medidas, como impuestos a flotas “viejas” o pico y placa para flotas privadas, pues actualmente se da la percepción de “premiar” los vehículos “viejos”, con menos impuestos y no de gratificar aquellos que contaminan menos. Se requiere definir metas específicas sobre las que se pueda hacer seguimiento con apoyo del gobierno. El gremio del gas natural está preparado para asumir esas metas y la comunidad también puede hacer presión bien orientada para que se tomen las decisiones en pro del ambiente y lograr impactos más concretos. Son varios retos para superar: crear los estímulos adecuados, incentivar la producción nacional de gas, garantizar el abastecimiento de gas en todo el país y establecer metas sectoriales de reducción de emisiones que nos permitan cumplir el Acuerdo de París (Revista Semana & Asociación Nacional de Gas Natural - Naturgas, 2017).

Estas conclusiones son apenas un atisbo de las preocupaciones del sector, no sólo por los impactos ambientales, sino también por la dinámica que presenta el consumo de GNCV. Si bien hay ciertos beneficios otorgados por el gobierno para quienes usen vehículos a GNCV, como menores impuestos para la importación de vehículos, se requieren exigencias directas que además obliguen el uso de vehículos con este combustible, y prácticas que apoyen los incentivos de los privados para la conversión de vehículos, como regulaciones ambientales para las flotas de servicio público o tránsito especial en las ciudades y en horario de pico y placa.

⁵ Impuesto al carbono (carbon tax): El Impuesto al carbono es un gravamen que recae sobre el contenido de carbono de todos los combustibles fósiles, incluyendo todos los derivados de petróleo y todos los tipos de gas fósil que sean usados con fines energéticos, siempre que sean usados para combustión (Congreso de la República de Colombia, 2016).

v. Pérdida de potencia de los vehículos convertidos.

Según aproximaciones con usuarios de vehículos, en la experiencia propia del autor, el hecho de que su automóvil pierda potencia al ser convertido para funcionar con GNCV es un factor determinante para decidir su uso y como se revisó en la sección 2.1.1.2, un vehículo convertido pierde hasta un 20% de potencia usando gas natural, lo cual constituye una debilidad que impacta negativamente el consumo.

Aunque según los expertos en conversión de vehículos a GNCV encuestados⁶, si a vehículos nuevos (modelos 2012 en adelante) se les instalan equipos de última tecnología, presentarán menores pérdidas de potencia que en el pasado (entre el 3% y el 5% comparado con vehículos a gasolina), y a pesar que en Colombia los distribuidores de gas natural ya han desarrollado iniciativas para disminuir la pérdida de potencia a través de una válvula compensadora de altura y adaptadores dosificadores de gas, que permiten el ingreso adicional de oxígeno al motor y mejoran su combustión, la pérdida de potencia persiste para los vehículos antiguos (previos a 2012).

Si bien, como se mencionó en la sección 4.1.1.1, hay una fortaleza desde el punto de vista mecánico, en cuanto al mantenimiento de vehículos convertidos, aquí se configura una debilidad que puede afectar el consumo de GNCV, pues con esta se está influyendo directamente en la decisión de los potenciales usuarios para que lo usen como combustible vehicular. Así, si no hay decisión de convertir vehículos entonces no habrá demanda y la curva no se revertirá como se esperaría.

⁶ Técnicos en conversión de vehículos, gerentes de talleres de conversión.

vi. Administración e implementación de procesos de certificación de vehículos y revisiones periódicas.

La certificación de vehículos y de las revisiones periódicas es un punto crítico en la industria del GNCV, ya que estas dan la garantía de que los vehículos funcionarán de manera correcta y segura. Por lo cual es una acción que se debe realizar con idoneidad, habilidad, ética, formación y calificación por parte de las personas encargadas, que suelen ser inspectores que trabajan con Organismos de Certificación contratados por quienes requieren estos servicios.

Sin embargo, como se maneja actualmente este proceso en la industria, y según aproximaciones con inspectores y empresarios que contratan los servicios de certificación⁷, se ha tenido la mala práctica de que el pago por certificar un vehículo sólo se hace si efectivamente el automóvil resulta certificado. Lo anterior, colateralmente afecta al inspector que es en quien finalmente está la decisión de certificar o no. Si el inspector no certifica, no recibe el pago correspondiente. De esta manera, se genera un problema en términos de competencia con otros organismos certificadores, más flexibles, los cuales serán preferidos por los usuarios para conseguir la certificación.

Así, este proceso hace débil el sistema de certificación y puede llegar a aumentar la desconfianza en la industria, por lo cual hay que revisar cómo hacer que las empresas ajusten el proceso para garantizar que se haga con profesionalismo y ética por parte de los inspectores y mitigar la realización de malas prácticas, que pueden repercutir en posibles futuros accidentes para los usuarios. La debilidad materializa al generarse desconfianza en la industria, repercutiendo en temores para los usuarios al momento de tomar decisiones sobre usar GNCV, afectando el crecimiento del consumo.

⁷ Aproximaciones con propietarios de talleres de conversión de vehículos a GNCV, inspectores de certificación de vehículos convertidos y profesionales comerciales de conversión de vehículos de distribuidoras de gas natural.

4.1.1.4 Amenazas

i. Regulación del precio de producción del gas natural.

El precio del gas natural depende de la tasa representativa del mercado, las condiciones económicas de los contratos de compra y transporte de gas que adquieren los comercializadores, el origen y la trayectoria del gas, la variación de los índices de precios al consumidor y al productor (IPC e IPP) y el valor del gas natural en el punto de entrada (precio a *boca de pozo*) (Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG, 2003). Si este último es alto entonces derivaría en que se den precios altos de GNCV. La amenaza parte entonces de que se establezca un alto precio de gas natural a *boca de pozo* por parte de los productores, situación que estaría susceptible de presentarse al estar liberado y no tener un tope, y al final se verá reflejado en lo que paga el usuario.

La liberación del precio del gas se implementó por parte de la Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG, bajo la Resolución No. 088 de 2013 (Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG, 2013). El exdirector ejecutivo de dicha Comisión, Germán Castro, dijo que el precio del gas en *boca de pozo* se liberó para que los productores y la demanda puedan encontrar una señal real en el mercado para negociarlo, y de esta manera, se envían señales que permiten determinar si se hacen o no inversiones (Mouthón, 2017). Sin embargo, según el expresidente de la Junta Directiva de Naturgas, Antonio Celia, el precio del gas en *boca de pozo* puede ser libre, pero debe tener un techo debido a que por su liberación, la demanda no ha subido porque se maximiza por parte de los productores y ese precio debería estar en función del precio FOB del gas que se importa (Revista Dinero, 2017). Adicionalmente, aseguró que debe tener este límite para que esté acorde con los precios internacionales y con el de los combustibles sustitutos y

finalmente, concluye que se puede buscar un mecanismo idóneo que mantenga un tope en el precio, pero que al tiempo no desestime la inversión en la producción (Mouthón, 2017).

El precio del gas natural en *boca de pozo* es alto en comparación con otros países y en Colombia hay pocos productores. Por lo tanto, al haber un precio libre entonces se produce a altos precios generando la reducción en la demanda que se ha presentado en los últimos años, lo cual da alcance también al GNCV. Para Antonio Celia, se deben colocar límites mesurados que permitan el crecimiento del sector (Celia, 2017).

De acuerdo con los datos estadísticos, desde 2013, cuando se expidió la Resolución de liberación de los precios del gas, el consumo de GNCV siguió la tendencia de decrecimiento que venía presentando desde 2006, lo que evidencia que dicha liberación no repercutió en un aumento del consumo. Es así como se infiere que el hecho que una falta de regulación en el precio del gas a *boca de pozo* o que exista una inestabilidad en los precios, representa una amenaza para el consumo del GNCV.

ii. Disminución de las actividades de exploración.

La disminución de las actividades de exploración es una amenaza que se ratifica con el cambio de ritmo en la producción de gas natural del país en los últimos años. Como lo muestra la Figura 13, entre 2004 y 2013 se produjeron alrededor de 600 GBTUD mientras que entre 2013 y 2018 tan solo fueron 250 GBTUD aproximadamente, menos de la mitad del primer periodo (2004-2013) y con una aparente proyección de caída. (Concentra, 2018)

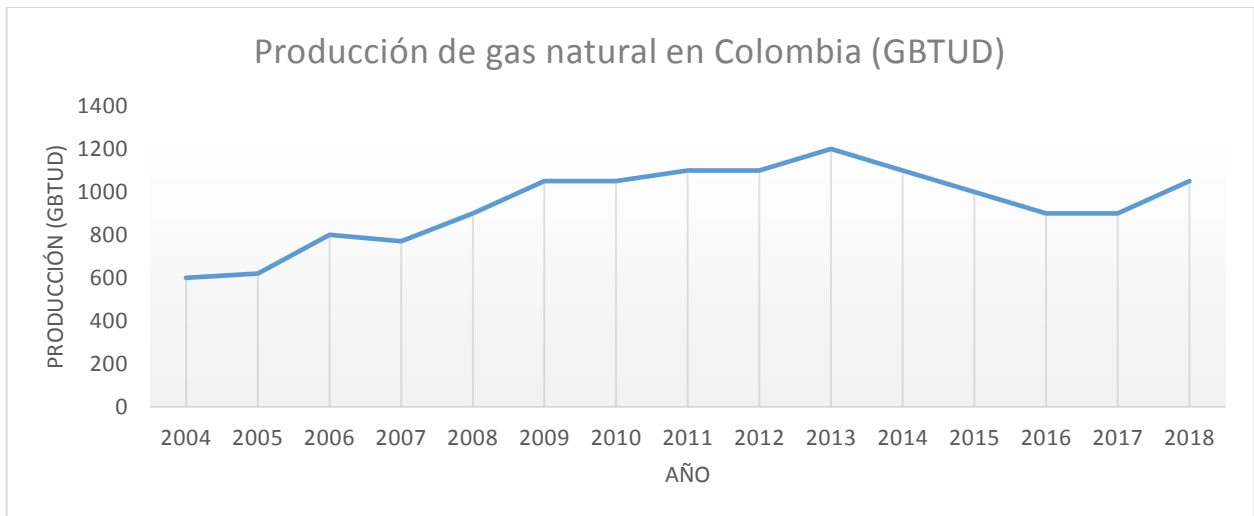


Figura 13. Producción de Gas Natural en Colombia. Elaboración propia del autor basada en el estudio de Concentra.

Respecto a lo anterior, representantes del sector de gas natural en el país han expresado su preocupación por la incertidumbre en torno al abastecimiento de este hidrocarburo para los próximos años, puesto que hasta el año 2017, Colombia contaba con reservas probadas de gas natural para 11,9 años y con reservas totales para 15,9 años, y para que estas continúen aumentando, se requiere de exploración y explotación, actividades que han disminuido desde 2014, cuando cayeron los precios internacionales del petróleo. Eric Flesch, actual presidente de Promigas, considera necesario que el Gobierno Nacional, el sector, los reguladores y explotadores trabajen en conjunto para aumentar la búsqueda de gas, y así tener muchas más reservas en el país (Heidy, 2018).

La importancia de mantener las actividades de exploración incide también en el entorno económico, toda vez que Ecopetrol ha incursionado en la bolsa de Nueva York colocando acciones en el mercado, lo cual conlleva a contar con contratos de venta de gas en firme para activar las reservas actuales, mantener un esfuerzo exploratorio para reposición de reservas, y mantener el flujo de caja de la compañía. Así lo determina la teoría económica de recursos agotables y no renovables expuesta por la CREG (CREG, 2012), dónde además se concluye que el

comportamiento de la industria a nivel mundial limita su posición dominante en el mercado colombiano.

Por su parte, Naturgas invita a impulsar más la búsqueda de gas nacional, cuyos precios siempre serán más competitivos, y resalta que a pesar de que ha habido poca exploración, se han presentado hallazgos importantes de gas en Córdoba y Sucre (Ahumada, 2018).

Con lo analizado anteriormente, existe preocupación en el sector porque en los últimos años no se les ha dado importancia a las actividades de exploración y al hecho que dichas acciones disminuyan, lo cual representa la amenaza para el consumo de GNCV, puesto que incidiría en el abastecimiento del combustible, y también en la economía del país. Así, se resalta la importancia que hay de mantener e incluso aumentar la exploración y la explotación de gas natural, para incrementar las reservas y dar seguridad para su uso en las diferentes industrias, entre ellas la vehicular.

iii. Incumplimiento de las normas y regulaciones del país.

Según lo experimentado en el marco de vigilancia y control de la Superintendencia de Industria y Comercio – SIC, en los últimos años se han encontrado incumplimientos con los reglamentos técnicos y la normatividad técnica para el sector GNCV.

En los últimos cinco años, se han realizado más de 450 actuaciones administrativas tendientes a verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos en los reglamentos técnicos aplicables tanto a talleres de conversión a gas natural vehicular como a estaciones de suministro de GNCV (Resoluciones No. 0957 de 2012 y 40278 de 2017), de las cuales actualmente más de 100 se encuentran aún en curso, y de estas se le han impuesto sanciones al sector por casi \$2.000.000.000.

Estas sanciones derivan en que los empresarios, muchos de ellos pequeños, son quienes deben pagar costos adicionales debido al incumplimiento de las normas establecidas, los cuales pueden

llegar a influir directamente en los costos que pagan los usuarios finales con la conversión de sus vehículos o el suministro de GNCV. Como sea, estos sobrecostos afectaran la mayor fortaleza del combustible que es su bajo precio.

Por otro lado, no sólo son las sanciones económicas que se están imponiendo, sino el por qué se están dando. Si se están presentando sanciones es porque hay no conformidades que pueden afectar la confianza de la industria, y de esta manera, aumentar el temor al uso de GNCV como combustible por parte de los potenciales usuarios. Así, la amenaza se materializa en que si no hay cumplimiento de la regulación, por un lado habrá una desmotivación por parte de empresarios a tener emprendimientos en torno al GNCV que puedan atender la posible demanda, dado que estarán expuestos a sanciones económicas absurdas de pagar; y por otro está en juego la confianza en el uso del combustible.

iv. Limitaciones en la capacidad operativa para la vigilancia y el control.

La SIC es la encargada de verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos en más de 32 reglamentos técnicos del sector industrial y comercial que le fueron asignados a nivel nacional, tendientes a garantizar la seguridad de los usuarios, protección al medio ambiente y la prevención de inducción al error.

Dentro de estos reglamentos se encuentran los relacionados con el GNCV, cuya verificación podría derivar en lo mencionado referente a generar la confianza en la industria que permita preservar y aumentar el consumo. Lo ideal es poder verificar la totalidad de los requisitos establecidos en todos los establecimientos que hay en el país. Pero la SIC sola se queda corta en esta labor, dada la actual capacidad en recursos humanos, técnicos y financieros; que si bien se puede apoyar en Organismos Evaluadores de la Conformidad, como se estableció en el Subsistema

Nacional de la Calidad, allí igualmente debe entrar a verificar el cumplimiento de los mencionados reglamentos.

En números se tiene que en el país hay más de 100 talleres de conversión de vehículos a gas natural y más de 900 estaciones de servicio para el suministro del combustible, sin embargo, en los últimos 5 años sólo se han verificado 80 talleres y 392 estaciones de servicio. Así se evidencia una amenaza, pues de no aumentar o mantener la capacidad operativa para realizar las verificaciones, aumentaría la exposición al incumplimiento de las regulaciones y se afectaría negativamente el consumo de GNCV.

v. Surgimiento de otras energías alternativas para el transporte.

Al tratar combustibles alternativos para el transporte, el gas natural no es la única opción para considerar, puesto que también se podrían discutir otras energías alternativas para reducir las emisiones y promover los conceptos de transporte sostenible, por ejemplo, los vehículos eléctricos y vehículos con combustible hidrógeno (Liang, Ren, Lin, & Liu, 2019). Las tecnologías de vehículos eléctricos han alcanzado un nivel de madurez que les ha permitido ser comercializadas con éxito en los últimos años (Ángel Reinemer, 2018) En Colombia se están promoviendo con fuerza los vehículos eléctricos (híbridos, de conexión y de batería recargable) a través de la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica y la Ley 1964 de 2019, que buscan acelerar su penetración en Colombia para que permita, generar menos emisiones en el sector transporte, usar de una forma eficiente y racional la energía y una movilidad sostenible (Gobierno de Colombia, 2019) (Congreso de Colombia, 2019).

Sin embargo, la implementación de vehículos eléctricos es un asunto que aún enfrenta cierta desfavorabilidad, producida por las industrias de automóviles de gasolina y diésel, y las condiciones de los mercados. Así lo refleja un estudio realizado en los países nórdicos como

Dinamarca, Islandia, Finlandia, Noruega y Suecia, lo que resulta en modelos de negocio y cadenas de suministro inadecuados que impiden la producción de vehículos eléctricos. Además, es de considerar que para una amplia difusión, estos vehículos deberán cambiarán la cadena tradicional de venta de automóviles, afectando directamente los métodos de venta, las fuentes de ingresos de mantenimiento y las estructuras de reabastecimiento (recarga). Lo anterior hace adoptar nuevos modelos, prácticas y métodos de negocio que sean adecuados para la difusión de vehículos eléctricos (Rubens, Noel, Kester, & Sovacool, 2020).

Actualmente las tecnologías desarrolladas en este sentido indican que no es una tecnología naciente, solo que en los últimos años parece estar resurgiendo. De esto se han dado cuenta usuarios, industrias y gobiernos. Anteriormente, eran empresas especializadas las que se encargaban de la producción limitada de vehículos eléctricos, hoy en día casi todas las marcas cuentan con al menos una línea de vehículo eléctrico en su portafolio (Reinemer, 2018). Reinemer muestra que la penetración en los diferentes mercados globales se ha presentado así: países como Noruega tienen tasas de crecimiento cercanas al 164% en las ventas de este tipo de vehículos, seguido por Canadá y USA con un 147% y 70% respectivamente (Reinemer, 2018). La penetración en el mercado colombiano ha sido creciente, y desde el año 2017 a 2019 este parque automotor creció de 196 a 3134 vehículos y en lo corrido de 2020 ya van más de 1398 unidades (ANDEMOS, 2020).

Lo anterior representa una amenaza para el consumo de GNCV en Colombia puesto que se podría estimar que con debilidades como el bajo nivel de reservas de gas natural no se pueda atender por muchos años a demanda vehículos a GNCV y que de seguir el ritmo creciente de los vehículos eléctricos esta alternativa tendría una participación más significativa dentro del mercado colombiano.

4.1.2. Estrategias DOFA

Teniendo establecidos los criterios del análisis anterior, y consolidados en la matriz DOFA, se procedió a formular las posibles estrategias que puedan llegar a promover el consumo de gas natural vehicular. Para esto se relacionaron los factores internos (fortalezas y debilidades) con los externos (oportunidades y amenazas), para aplicar las fortalezas, minimizar las debilidades, explotar las oportunidades y evitar las amenazas.

También se tomó como referencia a Michel Porter para la formulación de la estrategia y así, las estrategias formuladas a continuación fueron creadas desde una posición única y valiosa, involucrando diferentes conjuntos de actividades. Fue importante saber que la esencia de la estrategia es definir la posición de la industria (Porter, 1996). Se buscó que la industria de GNCV en Colombia adquiriera beneficios para que los usuarios potenciales ayuden a impulsar el consumo, de allí que se requieran también establecer necesidades de clientes, accesibilidad o variedad de servicios.

De esta manera, se determinaron las estrategias que pueden ser las que promuevan el consumo de GNCV en Colombia. Se definieron 11 estrategias potenciales, producto del análisis de los 20 criterios establecidos en el análisis DOFA, las cuales se dividieron en los cuatro de tipos de estrategias FO, FA, DO y DA:

FO1: Explotar nuevos yacimientos para aprovechar la infraestructura que tiene el país para la operación y suministro de GNCV.

En esta estrategia se resalta la importancia de la ampliación de la capacidad técnica y operativa que tiene actualmente el país para la operación y suministro de GNCV. Como se ha analizado, la infraestructura está bien desarrollada, lo que significa que se cuenta con la experiencia y el conocimiento necesarios, y que se podrían utilizar tanto para mantenerla como para ampliarla.

Pero esto no debe parar ahí, pues sería inoficioso tener una buena infraestructura si no hay gas para distribuir.

La producción de más gas natural se puede dar de explotar nuevos yacimientos, y saber aprovechar mas los que se tienen actualmente. Pero aquí también entran en juego dos aspectos: por un lado la relevancia de mantener la actividad exploratoria, y por otro tener la capacidad para importar GNL, empezando con la construcción de *plantas regasificadoras*; aspecto que tratará mas adelante en este estudio.

FO2: Implementar regulación sobre niveles de emisiones contaminantes que exijan estándares que beneficien el uso de gas natural como combustible vehicular, para mejorar la calidad del aire, disminuir la cantidad de gases efecto invernadero y dar cumplimiento al compromiso del país con la COP 21.

El consumo de GNCV se va podría ver beneficiado si se aplica enfáticamente la fortaleza que tiene sobre las bajas emisiones de gases efecto invernadero y material particulado para mejorar la calidad del aire. De esta manera, la forma más práctica de aplicar esta fortaleza es *obligando* a quienes potencialmente generan estos gases con combustibles tradicionales, gasolina y diésel, que se cambien y usen GNCV; lo cual se aseguraría más si se implementan regulaciones al respecto.

Así, con la ventaja en cuanto a emisiones que tiene el GNCV sobre la gasolina y el diésel, las regulaciones se pueden enfocar desde la parte ambiental, es decir que si se exigen niveles máximos de emisiones por parte de los vehículos que hacen parte del parque automotor, seguramente los usuarios no tendrán otra alternativa que la de cambiarse al uso de GNCV.

Como referencia para esta estrategia se puede recurrir al caso de Nigeria, dónde estudios sobre las barreras en el mercado de gas natural como combustible vehicular, los stakeholders indicaron que la ausencia de normas para emisiones vehiculares fue un factor que influyó en el

fracaso de las políticas de transporte y de la penetración de GNCV y que en este sentido los involucrados eran partidarios de realizar una reforma en el sector transporte (Ogunlowo, Bristow, & Sohail, 2017). Lo que soporta que regulaciones en materia ambiental pueden ser claves en el desarrollo del mercado de gas natural y su uso en el sector transporte.

Así una estrategia desarrollada con políticas ambientales puede llegar a contribuir en el aumento del consumo de GNCV y finalmente ayudará al compromiso ambiental que tiene el país con lo pactado en la COP 21, ya que si se le obliga al sector automotriz al uso de energías limpias, derivará en el cumplimiento con lo acordado ante el mundo, y se preservará un ambiente más sano en las ciudades del país.

FO3: Crear estímulos que incrementen el parque automotor de vehículos que usan GNCV, y renovarlo, con vehículos de servicio público, particular, transporte masivo y de carga, teniendo en cuenta, entre otras ventajas, las que ofrece el hecho de que el mantenimiento de estos vehículos es más fácil.

Para empezar, se podrían establecer estrategias comerciales por parte de los empresarios involucrados en la conversión de vehículos, las cuales resalten los beneficios mecánicos del uso de GNCV como combustible, en cuanto a la combustión más limpia y las facilidades de mantenimiento que ofrece, y así lograr que estas estrategias impulsen la conversión de vehículos y por ende aumente el consumo de GNCV que actualmente se da en promedio de 43.000 pies cúbicos al año por cada vehículo que usa el combustible, según se revisó en la sección 1 de este documento, es decir que si se duplica el número actual de automotores a GNCV, habrían más de un millón de unidades convertidas, lo que representaría un consumo anual promedio superior a los 50.000 MPC.

Pero los estímulos no sólo deberían ser para conversión de automóviles, también se pueden dar para la adquisición y uso de vehículos dedicados, facilitando la comercialización desde la importación con exención del gravamen arancelario en la importación de estos, que si bien actualmente es del 5%, se debería plantear la posibilidad que fuera 0%, así como sucede con los vehículos eléctricos (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2019). También se podría establecer la exención del impuesto a las ventas – IVA para incentivar su comercialización, puesto que actualmente este beneficio sólo está estipulado para los equipos que se instalan en las conversiones de vehículos a GNCV y es del 5% (Congreso de Colombia, 2016). Adicionalmente, ¿por qué no, mejor aumentar estos gravámenes para los vehículos que funcionan con gasolina o diésel? Aunque en Colombia no se cuenta con estudios, datos o experiencias similares que permitan analizar sobre la viabilidad de comercialización de vehículos dedicados y comparar con respecto a los automóviles de gasolina y diésel, algo que sería interesante considerar en estudios posteriores, adicional a que revisando casos similares se encontró que en China este tipo de vehículos son más costosos que los convertidos, dónde el Gobierno procura por políticas para promover estos automotores (Hao, Liu, Zhao, & Li, 2016).

Asimismo, se podría mirar hacia el transporte masivo de pasajeros, tanto urbano como flotas de servicio intermunicipal, y que por medio de políticas públicas se exigiera la implementación de estos vehículos funcionando con GNCV. Así como ha sucedido en las principales ciudades del país como en Bogotá, donde estarán operando 1.441 buses nuevos del sistema Transmilenio, de los cuales 741 funcionarán con GNCV⁸, (Transmilenio S.A., 2019). En Cali, la flota del sistema integrado de transporte masivo – Metrocali cuenta con más de 1.000 buses, de los cuales sólo 21 funcionan a GNCV y 135 son eléctricos (Metrocali, 2019) (Metrocali,

⁸ Entre julio de 2019 y marzo de 2020, entraron a operar 369 buses.

2019). En Medellín el Sistema Metro cuenta con 57 buses que funcionan con GNCV (Metro de Medellín, 2018). Lo que evidencia que aún mas buses de transporte masivo podrían trabajar con gas natural y se podría propender por que la totalidad de estas flotas funcionaran con este combustible, pero se deberán establecer las políticas gubernamentales que incluyan las correspondientes directrices en los planes de gobierno locales, así como los casos de Delhi y Atenas, dónde se implementaron directrices para que los buses públicos usen gas natural como combustible, teniendo en cuenta los bajos niveles de calidad del aire y la emisión de gases efecto invernadero que ocasionan estos buses (Krellinga & Badami, 2016) (Nanaki, Koroneos, Xydis, & Rovas, 2014).

Finalmente, para el sector del transporte de carga también es posible plantear estímulos ya que recientemente se ha empezado a sumar al uso de GNCV. A cierre de 2018 en Colombia empezaron a rodar 5 tractocamiones dedicados a gas natural (Promigas, 2018), y el total de vehículos de carga superaba las 300.000 unidades (Ministerio de Transporte, 2019); lo que indica que la porción de vehículos de carga que funcionan a GNCV en el país aún es mínima respecto a los aún usan combustibles líquidos. Según lo anterior, el GNCV es una opción nueva para los vehículos de carga, así como en Europa se ha estudiado que el gas natural podría ser un opción confiable también para este tipo de automotores, dados los beneficios ambientales que ofrece, en Colombia también puede funcionar adicional a la iniciativa que ya se ha dado con gas natural comprimido (Osorio-Tejada, Llera-Sastresa, & Scarpellini, 2017).

FA1: Construir nuevas plantas regasificadoras para ampliar la infraestructura desarrollada que tiene el país, y así en caso de escasez de las reservas o si se presentara alguna política para la disminución de actividades de exploración, se tenga la oportunidad de importar GNL.

El hecho de tener una buena infraestructura, junto con la experiencia y conocimiento que ello denota, infiere en que se podría buscar ampliarla, y que con la ampliación se requerirán mayores reservas de gas natural. Estas dos cosas confluyen en que la ampliación se podría encaminar hacia la construcción de nuevas plantas regasificadoras (Terminales de Regasificación de Gas Natural Licuado). Estas nuevas plantas permitirían que se pueda importar gas y suplir la eventual demanda, teniendo en cuenta que se tiene la amenaza que se presenten políticas para la disminución de actividades de exploración de gas natural.

Para apoyar lo anterior, en un estudio de Saldarriaga y Salazar, se concluyó que la baja confiabilidad del suministro de gas natural y de la infraestructura en el transporte, basados en condiciones climatológicas y operativas, confirma que la solución para mitigar estos problemas es la construcción de *plantas regasificadoras*. Así mismo, contar con estas terminales evitará las consecuencias que resulten de las intervenciones regulatorias o políticas relacionadas con la actividad exploratoria (Saldarriaga-C & Salazar, 2016).

Es una amenaza que se puede minimizar al explotar la fortaleza que hay en la infraestructura desarrollada del país. Se sabe que hay buena capacidad tecnológica y logística para producir y distribuir gas natural, y que entre mayor sea la actividad exploratoria, se aumentarían las probabilidades de tener mayores reservas; pero evidentemente se requiere la asociatividad de todos los agentes involucrados empezando por el Gobierno, para acordar mecanismos y que esto se logre.

FA2: Aumentar la capacidad de generar empleos calificados, que contribuyan con el aseguramiento de la calidad en los procesos de conversión y certificación a GNCV, y así mitigar el incumplimiento de las normas y regulaciones.

Que la industria de GNCV exija personal certificado hace que haya una ventaja con el hecho de que los empresarios generen empleos calificados, dado que los procesos conversión, certificación de vehículos y la operación y mantenimiento en estaciones de suministro, aseguran la calidad de los mismos y que se ajusten a los diferentes estándares establecidos, es decir, que haya mayor cumplimiento de las normas. Con esto, se tiene la certeza de que las personas que ejecutan los procesos relacionados, contarán con la capacidad técnica y el profesionalismo necesarios para desarrollar las labores correctamente, lo cual evitará la amenaza que hay con las inconformidades y demás hallazgos que se podrían dar o que se están presentando.

FA3: Implementar un régimen regulado para el precio de producción del gas natural, que permita controlar y mantener la diferencia significativa con respecto a los combustibles líquidos.

Es importante mantener una amplia brecha entre los precios y el panorama parece alentador dado que esta distancia entre los precios de la Gasolina y los del Gas Natural Vehicular está siendo significativa nuevamente. En ciudades como Bogotá, Cali y Barranquilla se está pagando por el galón de gasolina un promedio de 80% más de lo que los usuarios de GNCV pagan por galón equivalente. Hoy son cerca de 200 mil los vehículos que funcionan con GNCV en Colombia, 600 de los cuales incluyen buses y tractocamiones para el transporte de pasajeros y de carga (Asociación Colombia de Gas Natural - Naturgas, 2018).

En este aspecto, vale la pena remitirse a una de fortalezas del GNCV, como lo es el bajo precio que pagan los consumidores finales y que, como se debe tratar en un análisis DOFA, hay que maximizarla al tiempo que la amenaza se minimiza. Una manera de minimizar la amenaza que representa el precio de producción de gas natural sería haciendo que este sea regulado y tenga un límite, permitiendo establecer precios bajos en el suministro final. Se trata de implementar una política en los precios del gas natural por parte del gobierno, que active el crecimiento del mercado.

Y para asegurar que el precio del GNCV se mantenga favorable respecto a sus sustitutos, gasolina o diésel, y que esta siga siendo una gran fortaleza para el consumo, sería clave implementar regulación sobre el precio que se está dando por producir gas natural (precio a *boca de pozo*). Se debe tener presente que este precio es como el de materia prima para la fabricación de un producto, es decir que su costo influirá directamente en el precio final que pagará el consumidor. Si este precio es libre, como sucede actualmente, los productores podrán fijar un precio que puede ser alto si no se tiene la competencia ni la demanda mínima, y de esta manera, los comercializadores que adquieren el gas partirán de ahí para fijar su precio de venta al público, que naturalmente será alto.

Y es que el precio de combustibles es un aspecto clave para el desarrollo de estos mercados, en Nigeria por ejemplo, en un análisis para la industria automotriz, los stakeholders indicaron que era importante remover los precios de subsidios para la gasolina y kerosene y establecer precios apropiados del gas con la expectativa de que estas medidas mejorarían la eficiencia del mercado y harían que este combustible sea más competitivo (Ogunlowo, Bristow, & Sohail, 2017). Otro estudio sobre las fallas del mercado de GNCV en Alemania también detectó que las exenciones de impuestos y los bajos precios del combustible reducen los costos en un 50% en comparación con los vehículos convencionales (Rosenstie, Heuermann, & Hüsigg, 2015).

Conforme a lo anterior, si hay regulación para colocar precios tope al gas natural a *boca de pozo*, y estos son bajos, entonces el costo de esta materia prima será bajo para los comercializadores también, lo cual le permitirá fijar precios bajos para la venta al público, acrecentando así la ventaja sobre la gasolina o el diésel.

DO1: Aumentar el potencial de reservas de gas natural, manteniendo las actividades de exploración que abran la posibilidad de explotar nuevos yacimientos.

Esta estrategia se encamina hacia que Colombia tenga más reservas de gas natural, lo cual es actualmente una debilidad, y para lograrlo se sugiere que se deban explotar nuevos yacimientos. Pero si se materializa la amenaza de que se disminuyan las actividades de exploración, entonces la oportunidad para explotar desaparecería.

Así las cosas, la estrategia no debe ser otra que la de mantener dichas actividades exploratorias para que se mantenga la oportunidad de encontrar nuevos yacimientos, y así, contar con nuevas reservas, lo que también haría minimizar la situación de la escasez de gas natural en Colombia.

DO2: Hacer ajustes a los procesos de certificación de vehículos.

Las preocupaciones y quejas del sector del GNCV sobre la ausencia de políticas públicas que estimulen el consumo son diversas, por lo tanto, buscar una estrategia que atienda todas sería una tarea compleja. Sin embargo, teniendo en cuenta que también se presenta la debilidad en los procesos de certificación de conversión de vehículos y de las revisiones periódicas, es posible determinar una primera estrategia.

En este sentido, se deberá procurar por hacer revisiones y ajustes a la manera como se están haciendo las certificaciones por parte de los organismos certificadores de los vehículos que funcionan a GNCV. Así mismo, se deberá estipular que las condiciones comerciales y contractuales de certificación estén totalmente desligadas de los resultados de las inspecciones; por ejemplo si a un vehículo se le aprueba o no una inspección, igual se pagará el servicio tanto al organismo como al inspector, eliminando así la mala práctica que tiene viciada la industria.

DO3: Adoptar un sistema de subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos para dirimir el hecho de que en Colombia no hay una política pública que estimule el consumo de GNCV.

Esta estrategia apunta que por parte del gobierno se debería adoptar un sistema de subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos, con descuentos en el suministro de gas en estaciones de servicio aliadas, lo cual puede ser a través de fondos entre empresas y entidades gubernamentales. Para esto, se pueden tomar como modelo, las experiencias exitosas que se han desarrollado a modo particular, programas o iniciativas en materia de ayudas o financiamientos que antes han estimulado el consumo de GNCV.

El estudio realizado en Nigeria con los stakeholders de la industria del GNCV concluyó que reformas en el mercado energético son fundamentales para su desarrollo, tales como facilitar el desarrollo de talleres de conversión y en esto cabe la estrategia de la adopción de subsidios y financiamientos (Ogunlowo, Bristow, & Sohail, 2017). También en el Reino Unido, un estudio sobre el mercado de vehículos livianos a GNCV, reflejó que ante los diferentes intentos por introducir vehículos a gas natural, cómo subsidios para transporte de carga pesada y campañas publicitarias, que no han tenido mayor impacto, y ante la ausencia de fabricantes de vehículos originales, surgió la necesidad de estimular la conversión de vehículos (Kirk, Bristow, & Zanni, 2014).

Así se reafirmaría la importancia de insistir en la conversión de vehículos y de esta manera explotar mas el mercado del GNCV en Colombia, aunado al potencial que hay según el parque automotor de Colombia, de vehículos livianos y por ello también pueden ser siendo útiles y necesarios los subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos.

DA1: Aumentar la importación del GNL para contrarrestar eventuales disminuciones de actividades exploratorias y menguar el hecho de que Colombia no tiene potencial de reservas de gas natural.

Con esta estrategia se trata la amenaza de que haya disminución de actividades de exploración y la debilidad del país en cuanto a las bajas existencias de gas natural, pero además se retoma la oportunidad para importar GNL, que va de la mano con la construcción de nuevas *plantas regasificadoras*.

Así, la manera sugerida para minimizar y evitar estas debilidades y amenazas es con la importación de GNL, para lo cual ya se han desarrollado proyectos de construcción de terminales de regasificación, y sería importante seguir proponiendo otros, ya que aunado a lo concluido por Saldarriaga y Salazar, esto ayudaría a la confiabilidad en el suministro de gas natural (Saldarriaga-C & Salazar, 2016).

DA2: Ampliar la capacidad operativa para la vigilancia y el control, en aras de evitar el incumplimiento de las normas y regulaciones del país.

Ampliar la capacidad operativa para la vigilancia y el control, por parte de las Entidades que ejercen estas funciones en la industria del GNCV, significa entregar más recursos a ellas para que puedan ampliar su campo de acción en las verificaciones. Conforme se expuso anteriormente, una mayor vigilancia repercutirá en quienes se deben ajustar a las normas relacionadas para que sean cuidadosos en su cumplimiento, y por lo tanto se evitarán en el futuro las inconformidades con la normatividad establecida.

4.2. Etapa 2: ANÁLISIS MULTICRITERIO

Una vez establecidas las once estrategias sugeridas por el estudio DOFA en el capítulo anterior, el siguiente paso fue determinar cuál de ellas será la más importante y efectiva para revertir la tendencia de decrecimiento del consumo de GNCV en Colombia. Para lograrlo, se realizó un análisis multicriterio que consideró las opiniones de expertos involucrados con el gas

natural desde sectores como el Gobierno, agremiaciones, agentes privados, distribuidoras y comercializadoras, quienes calificaron y validaron las estrategias formuladas y los factores DOFA; con lo que se construyó una matriz multicriterio y se asignaron pesos normalizados a los criterios establecidos para parametrizar un modelo matemático cuyo resultado arrojó la priorización de las estrategias planteadas y determinó la primera que se debería implementar para lograr el objetivo.

Se categorizaron las alternativas en un orden de importancia o trascendencia, con base en la validación que dieron los stakeholders de la industria, y al final se desarrolló un proceso de toma de decisiones multi-criterio (Multi-Criteria Decision Making – MCDM), que junto con un modelo de programación por objetivos – *Goal Programming*, estableció el orden de las estrategias establecidas.

A partir del análisis DOFA realizado, 14 expertos realizaron una calificación conceptual sobre el desempeño de cada una de las estrategias sugeridas, en función de criterios relativos a las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas para el consumo de GNCV en Colombia y calificaron la relevancia que tiene cada criterio para implementar las estrategias planteadas. Los expertos quedaron relacionados en la Tabla 7 relacionada a continuación.

Tabla 7. Expertos consultados. Elaboración propia.

SECTOR	TIPO EMPRESA	CARGO	PERFIL
	Asociación de gas natural	Secretario	Economista con Maestría en Economía y en Energía y Minería, más de 8 años de experiencia en el sector de gas natural
Agremiación	Asociación de centros de diagnóstico automotor	Vicepresidente Técnico	Ingeniero Mecánico Comisiones Técnicas de GNCV Director Técnico de revista de gas vehicular
	Empresa de estudios energéticos	Analista de estudios	Jefe de división de inspección de EDS de GNCV y Talleres de Conversión 5 años de experiencia en la rama de gas natural
	Instituto normalizador	Profesional de normalización	Ingeniero Mecánico 20 años de experiencia en el sector de GNCV Coordinador del Comité

			que normaliza la parte de GNCV en Colombia
	Ministerio público	Profesional de la Dirección Hidrocarburos	Ingeniero Industrial 4 años de experiencia en el área de gas natural
	Ministerio público	Profesional Especializado de la Dirección de Regulación Superintendente	Ingeniero Electrónico 10 años de experiencia en el sector de GNCV
Gobierno	Ministerio público	Delegado para el Control y Verificación de Reglamentos Técnicos	Abogado Parte de la Comisión Intersectorial de la Calidad y de la Comisión Intersectorial de Regulación Técnica
	Compañía petrolera	Desarrollador de Negocios de Gas	Administrador de Empresas con 14 años de experiencia en el sector de GNCV, negocios y distribución
	Unidad pública de energía	Profesional Especializado Subdirección de Demanda	Ingeniera Química 6 años de experiencia en GNCV
	Taller de conversión	Ingeniero de Proyectos	Ingeniero Mecánico con más de 20 años de experiencia en el sector de GNCV, conversión de vehículos e importación de equipos para instalación
	Taller de conversión	Gerente	Economista con 18 años de experiencia en el sector de conversiones a GNCV
Agentes privados	Distribuidora de gas natural	Técnico GNV	Ingeniero Mecánico con más de 14 años de experiencia en el sector de GNCV, conversión de vehículos y suministro de GNCV
	Transportadora de gas nacional	Líder de URBES	Administrador de Empresas con 18 años de experiencia en el sector de Gas Natural
	Empresa de exploración petrolera	Director comercial de conversiones	Economista con 27 años de experiencia en el sector de GNCV

4.2.1. Calificación conceptual

Para empezar, la calificación conceptual se hizo por medio de encuestas a los stakeholders, en las que ellos dieron una calificación de la relevancia que consideran que tienen los criterios DOFA propuestos, para implementar las estrategias formuladas. Dicha evaluación se configuró dentro de una escala de variables lingüísticas, en la que se estipuló una escala de conceptos desde una relevancia *muy alta* hasta *muy baja*, como se muestra en la Tabla 8.

Con los resultados obtenidos de las encuestas realizadas, se elaboró y consolidó una matriz multicriterio – matriz MCDM (ver Tabla 9), en la que se registró la relevancia considerada en cada criterio DOFA (Cn), por cada uno de los expertos, para implementar cada una de las estrategias planteadas (An) y que permitiera alcanzar el objetivo T. El modelo de la encuesta utilizado se puede revisar en el Anexo B.

Tabla 8. Variables y calificaciones sugeridas. Elaboración propia.

RELEVANCIA	
MUY ALTA	MLT
SIGNIFICATIVAMENTE ALTA	SA
ALTA	ALT
MEDIA	MED
BAJA	BAJ
SIGNIFICATIVAMENTE ALTA	SB
MUY BAJA	MBJ
NO TIENE RELACIÓN	0

Tabla 9. Matriz MCDM. Elaboración propia.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
A1	MLT	NA	NA	NA	NA	NA	MLT	ALT	NA	NA	MLT	NA	NA	NA	NA	NA	MLT	NA	NA	NA	NA
A2	NA	NA	MLT	NA	NA	MLT	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	ALT	NA	NA	NA	NA	ALT	MLT	NA
A3	NA	MLT	MED	MED	BAJ	NA	NA	NA	MLT	MLT	NA	NA	NA	BAJ	ALT	BAJ	NA	NA	MLT	MBJ	NA
A4	MED	NA	NA	NA	NA	NA	ALT	ALT	NA	NA	MLT	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
A5	NA	NA	NA	MED	ALT	NA	NA	NA	MLT	NA	NA	NA	NA	MED	NA	MLT	NA	NA	ALT	ALT	NA
A6	MBJ	MLT	NA	NA	NA	NA	NA	NA	MLT	NA	NA	NA	MLT	MLT	NA	NA	ALT	MBJ	ALT	NA	NA
A7	ALT	NA	NA	NA	NA	NA	MLT	MLT	NA	NA	MLT	NA	NA	NA	NA	NA	NA	BAJ	NA	NA	NA
A8	NA	NA	NA	NA	MED	NA	NA	NA	MLT	MBJ	NA	NA	NA	MLT	NA	MBJ	NA	NA	MLT	ALT	NA
A9	NA	MLT	NA	BAJ	MED	NA	NA	NA	MED	ALT	NA	NA	MLT	MBJ	MED	NA	BAJ	NA	NA	MBJ	NA
A10	MLT	NA	NA	NA	NA	NA	MBJ	MLT	NA	NA	ALT	NA	NA	NA	NA	NA	NA	BAJ	NA	NA	NA
A11	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	MLT	MLT	NA
T	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT

4.2.2. Matriz MCDM

Ahora bien, a las calificaciones obtenidas se les dio una asignación numérica aplicando técnicas de *números difusos (fuzzy numbers)*, *triangular fuzzy numbers (TFN)* y de *centro de gravedad (CoG)*, como sugiere Khan en la ecuación (7) (Khan I. M., 2018), y de esta manera las apreciaciones que dieron los stakeholders sobre las estrategias sugeridas, obtuvieron los valores numéricos que se muestran en la Tabla 10.

$$\text{Eq. (7)} \quad x = \frac{x^L + 2x^M + x^R}{4}$$

Donde x es el valor de los números difusos triangulado (TFN), x^L es valor izquierdo de los números difusos, x^M es el valor medio de los números difusos, y x^R es el valor derecho de los números difusos, según la Tabla 10.

Tabla 10. Asignación numérica de las calificaciones. Elaboración propia basada en (Khan I. M., 2018).

RELEVANCIA		TFN	Fuzzy numbers		
MUY ALTA	MLT	9,75	9	10	10
SIGNIFICATIVAMENTE ALTA	SA	8,50	7	9	9
ALTA	ALT	7,00	5	7	9
MEDIA	MED	5,00	3	5	7
BAJA	BAJ	3,00	1	3	5
SIGNIFICATIVAMENTE BAJA	SB	1,50	1	1	3
MUY BAJA	MBJ	0,75	0	1	1
NO TIENE RELACIÓN	NA	0,00	0	0	0

Con esta asignación numérica se construyó una nueva matriz MCDM, ilustrada en la Tabla 11, en la que se registraron los valores cuantitativos correspondientes a las apreciaciones que dieron los encuestados. Esta nueva matriz dejó ver que, para los stakeholders, una significativa cantidad de relaciones *critérios-estrategias* tuvieron relevancia *media* a *alta* para ser implementadas; pero también que hay varias de estas cuya relevancia se estimó *muy baja* o no tuvieron relación. Estos datos son útiles para que los responsables de la toma de decisiones – *decision makers* – cuenten con mayor información relevante que les facilite realizar esta labor.

Tabla 11. Nueva matriz MCDM. Elaboración propia.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
A1	9,75	0	0	0	0	0	9,75	7	0	0	9,75	0	0	0	0	0	0	9,75	0	0	0
A2	0	0	9,75	0	0	9,75	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	7	9,75	0
A3	0	9,75	5	5	3	0	0	0	9,75	9,75	0	0	0	3	7	3	0	0	9,75	0,75	0
A4	5	0	0	0	0	0	7	7	0	0	9,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A5	0	0	0	5	7	0	0	0	9,75	0	0	0	0	5	0	9,75	0	0	7	7	0
A6	0,75	9,75	0	0	0	0	0	0	9,75	0	0	0	9,75	9,75	0	0	7	0,75	7	0	0
A7	7	0	0	0	0	0	9,75	9,75	0	0	9,75	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
A8	0	0	0	0	5	0	0	0	9,75	0,75	0	0	0	9,75	0	0,75	0	0	9,75	7	0
A9	0	9,75	0	3	5	0	0	0	5	7	0	0	9,75	0,75	5	0	3	0	0	0,75	0
A10	9,75	0	0	0	0	0	0,75	9,75	0	0	7	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
A11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,75	9,75	0
T	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT	MLT

En el siguiente paso se establecieron pesos a los criterios establecidos en el análisis DOFA. Para lo cual también se asignó una calificación cualitativa, determinando una variable lingüística

que va desde un término *significativamente bajo* hasta uno *significativamente alto* (ver Tabla 12), a los factores estimados en el resultado DOFA e igual que en el paso anterior. Se usaron las técnicas de *números difusos (fuzzy numbers)*, *triangular fuzzy numbers (TFN)* y *centro de gravedad (CoG)* para transformar esta calificación en valores numéricos según la ecuación (8) (Khan I. M., 2018).

$$\text{Eq. (8)} \quad w = \frac{w^L + 2w^M + w^R}{4}$$

Donde w es el valor de los números difusos triangulado (TFN), w^L es valor izquierdo de los números difusos, w^M es el valor medio de los números difusos y w^R es el valor derecho de los números difusos, según la Tabla 12.

Tabla 12. Calificación para los pesos de los criterios DOFA. Elaboración propia basada en (Khan I. M., 2018).

VR LINGÜÍSTICA	CALIFIC.	TFN	Fuzzy numbers		
Significativamente bajo	SB	0,10	0	0,1	0,2
Muy muy bajo	MMB	0,20	0,1	0,2	0,3
Muy bajo	MB	0,30	0,2	0,3	0,4
Bajo	B	0,40	0,3	0,4	0,5
Medio	M	0,50	0,4	0,5	0,6
Alto	H	0,60	0,5	0,6	0,7
Muy alto	MA	0,70	0,6	0,7	0,8
Muy muy alto	MMA	0,80	0,7	0,8	0,9
Significativamente alto	SA	0,90	0,8	0,9	1

Para efectos del cálculo de la programación por objetivos, se normalizaron los pesos obtenidos, como se ilustra en la Tabla 13 y según la ecuación (9).

$$\text{Eq. (9)} \quad w = \frac{w'}{\sum_{j=1}^n w'}$$

Donde w es el valor del peso normalizado y w' es valor de los pesos de cada criterio, según la Tabla 13.

Tabla 13. Normalización de los pesos de los criterios DOFA. Elaboración propia.

No.	Criterio	CALIFIC.	Peso	Peso Norm.
1	Infraestructura bien desarrollada en el país	MMA	0,80	0,068
2	Bajo precio del GNCV. Favorable respecto a la gasolina o el diésel	H	0,60	0,051
3	Menos emisión de gases efecto invernadero	SA	0,90	0,076
4	El mantenimiento de vehículos convertidos es más fácil	SB	0,10	0,008
5	Generación de empleos calificados	MB	0,30	0,025
6	Colombia no tiene potencial de reservas de gas natural	MA	0,70	0,059
7	Colombia no es fabricante de componentes para la conversión de vehículos	SB	0,10	0,008
8	Incertidumbre en el comportamiento del precio de los combustibles	M	0,50	0,042
9	No hay una política pública que estimule el consumo de GNCV	MMA	0,80	0,068
10	Pérdida de potencia de los vehículos convertidos	M	0,50	0,042
11	Procesos de certificación de vehículos y de las revisiones periódicas	B	0,40	0,034
12	Compromiso del país con la COP 21	A	0,60	0,051
13	El aprovechamiento y explotación de nuevos yacimientos	M	0,50	0,042
14	Importar gas natural licuado. Construcción de plantas regasificadoras	MA	0,70	0,059
15	Aumento del tamaño y renovación del parque automotor	B	0,40	0,034
16	Adoptar programas de subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos	SA	0,90	0,076
17	Falta de regulación del precio de producción del gas natural	MMA	0,80	0,068
18	Disminución de actividades de exploración	SA	0,90	0,076
19	No cumplimiento de las normas y regulaciones del país	MA	0,70	0,059
20	Limitaciones en la capacidad operativa para la vigilancia y el control	M	0,50	0,042
21	Surgimiento de otras energías alternativas para el transporte	SB	0,10	0,008

4.3. Etapa 3: Priorización de estrategias. Programación por objetivos.

Por último, se seleccionó la mejor estrategia que se deberá implementar para alcanzar el objetivo propuesto y se categorizaron las demás en el respectivo orden de prioridad, lo cual se desarrolló con un método multicriterio denominado programación de metas o por objetivos – *Goal Programming*. Con este método se buscó optimizar una función objetivo, cuyo resultado indica la primera estrategia que se debería implementar.

La formulación del modelo matemático del cálculo es la siguiente:

Minimizar:

$$\text{Eq. (1)} \quad \text{Función Objetivo} = \sum_{j=1}^n w_j^+ d_j^+ + w_j^- d_j^-$$

Sujeto a:

$$\text{Eq. (2)} \quad \sum_{i=1}^m a_{ij}x_i + d_j^- - d_j^+ = g_j \quad \forall_j$$

$$\text{Eq. (3)} \quad \sum_{i=1}^m x_i = 1$$

$$\text{Eq. (4)} \quad w_j^+ = w_j^- = w_j$$

$$\text{Eq. (5)} \quad d_j^+, d_j^- \geq 0 \quad \forall_j$$

$$\text{Eq. (6)} \quad x_i \in \{0,1\} \quad \forall_j$$

Dónde m representa la estrategia a evaluar, n el criterio a considerar, a es la calificación que asignaron los stakeholders, x es la variable de decisión que toma valores de 0 o 1, siendo 1 que se selecciona la estrategia ya que es la más importante y efectiva y 0 que se descarta; d son las desviaciones superiores e inferiores que tiene el objetivo g y w son los pesos normalizados de los subfactores DOFA.

El modelo de programación fue corrido en el software *Gurobi 8.0.1*, sobre *Python 3.11*, con licencia académica, y el código del programa respectivo se puede revisar en el Anexo D. Los resultados indicaron que la alternativa A3, denominada FO3, es considerada como la primera estrategia, al ser la más importante y efectiva a implementar para revertir la tendencia decreciente del consumo de GNCV.

Ahora, para categorizar las demás alternativas, se ignoró del cálculo la estrategia que ya se seleccionó y se volvió a correr el modelo para determinar la siguiente y así de manera progresiva hasta que quedó la última estrategia, que es la menos favorable a implementar. Los resultados con el ranking de las estrategias se muestran en la Tabla 14:

Tabla 14. Ranking de las estrategias. Elaboración propia.

No.	Estrategia	Función objetivo
1	FO3	6.3974
2	FA3	6.57692
3	FA2	7.09401
4	FO2	7.16239
5	DO2	7.39957
6	DO3	7.58547
7	FO1	7.61752
8	DA1	8.19017
9	DO1	8.20726
10	FA1	8.71581
11	DA2	8.74999

Así el orden de priorización de las estrategias quedó:

FO3: Crear estímulos para el uso de GNCV en vehículos particulares y de servicio público.

FA3: Implementar un régimen regulado para el precio de producción del gas natural.

FA2: Generar empleos calificados para los procesos de conversión y certificación a GNCV.

FO2: Implementar regulación sobre niveles de emisiones contaminantes.

DO2: Hacer ajustes a los procesos de certificación de vehículos.

DO3: Adoptar un sistema de subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos.

FO1: Explotar nuevos yacimientos y aprovechar la infraestructura que tiene el país para la operación y suministro de GNCV.

DA1: Aumentar la importación del GNL.

DO1: Aumentar el potencial de reservas de gas natural.

FA1: Construir nuevas plantas regasificadoras.

DA2: Ampliar la capacidad operativa para la vigilancia y el control.

4.4. Estrategia Seleccionada

Los resultados del anterior análisis multicriterio indican que la estrategia más apropiada para incrementar el consumo de GNCV es la de crear estímulos que incrementen el parque automotor de vehículos que usan este combustible, y renovarlo, con mayores conversiones de vehículos livianos y con vehículos de carga dedicados. En esta estrategia se contemplaron acciones relacionadas con el mejoramiento en la promoción de conversión de vehículos, la adquisición y uso de vehículos dedicados, estipular el uso de GNCV para flotas de transporte masivo de pasajeros urbano e intermunicipal y promoverlo en el sector del transporte de carga. Sin embargo, es importante tener en cuenta que no se encontraron estudios, datos o experiencias similares que permitan analizar sobre la viabilidad de comercialización de vehículos livianos dedicados en Colombia que permitan comparar con respecto a los automóviles de gasolina y diésel, y que ya hay iniciativas con buenos resultados que se están dando para el GNCV en el transporte masivo de pasajeros urbano, como las de Bogotá, donde nuevos buses del sistema Transmilenio funcionarán con GNCV, (Transmilenio S.A., 2019), en Cali, la flota del sistema integrado de transporte masivo – Metrocali ya inició con 21 buses funcionando a GNCV (Metrocali, 2019) (Metrocali, 2019) y en Medellín el Sistema Metro cuenta con 57 buses (Metro de Medellín, 2018). Lo que sugiere que la estrategia se debería enfocar en reforzar y complementar esos estímulos para la conversión de vehículos que han funcionado, como los revisados en la sección 4.1.1.2 (ordinal v); y mirar hacia la oportunidad que hay en el transporte de carga, que tiene una importante flota dentro del parque automotor del país, como se analizó en las secciones 1 y 4.1.1.2 (ordinal iv). A continuación, se amplía más sobre estas dos opciones.

Para empezar, la estrategia deberá contemplar acciones encaminadas a que los talleres de conversión y demás involucrados en transformación de vehículos, refuercen y desarrollen nuevos

estímulos para que más vehículos se conviertan, resaltando los beneficios mecánicos para los automóviles que funcionan con GNCV en cuanto su mantenimiento y que el motor se verá beneficiado por el cambio del combustible. Pero la motivación a la conversión de vehículos no sólo podrá basarse en los beneficios mecánicos, sino que deberá trabajar en otros aspectos importantes de estos procedimientos como el hecho de asegurarse que el personal que ejecuta las labores es idóneo y cuenta con las competencias técnicas que dan la confianza de que se hacen trabajos con calidad, que se disponen de procesos de certificación debidamente acreditados, que las empresas (talleres y otros involucrados) están disponibles para brindar buena atención posterior a la conversión y procurar por tener precios competitivos. Como complemento a lo anterior es importante desarrollar efectivas labores de mercadeo con las cuales se logre ampliar los sectores dónde hay potencial de vehículos para convertir, como por ejemplo:

- Convenios para realizar conversiones corporativas ofreciendo la opción del GNCV a flotas empresariales, como lo hizo la empresa Aguas de Cartagena – Acucar, empresa de servicios públicos que cuenta con 50 vehículos pick up 4x2 convertidos a gas natural (Promigas, 2019).
- Convenios con marcas de automóviles reconocidas para realizar conversiones a los vehículos originales como lo hace la firma Renault que ofrecen este servicio con beneficios de respaldo, soporte postventa y garantía de la marca (Renault, 2020).
- Buscar la opción que los vehículos oficiales se conviertan a usar GNCV, sector que cuenta con una flota de más de 60.000 vehículos livianos, entre automóviles, camionetas y camperos (Ministerio de Transporte, 2019).

En la sección 5.2 se muestran cifras del impacto que podrían alcanzar los talleres de conversión si implementan acciones como las que se acaban de mencionar.

En cuanto al transporte de carga, que ha sido tal vez en el que menos se había pensado el uso del gas natural como combustible, está la posibilidad de que se podrían plantear estímulos para que este sector se sume masivamente al uso de GNCV. Lo anterior teniendo en cuenta que a 2018 rodaban en Colombia más de 265.000 camiones, más de 55.000 tractocamiones y alrededor de 50.000 volquetas, es decir más de 370.000 vehículos de carga (Ministerio de Transporte, 2019). Adicionalmente, han comenzado a operar tractocamiones dedicados a gas natural en las carreteras del país, con un cierre a 2019 de más de 150 de estos vehículos dedicados, esto como producto de proyectos piloto de empresas ven allí una importante oportunidad para reducir su huella de carbono y así contribuir al logro de sus objetivos en materia de sostenibilidad. Empresas como Cargill, dedicada a la comercialización de granos y oleaginosas y a las premezclas de productos de nutrición animal, integró 5 de estos tractocamiones a su flota de suministros, con lo que pudo aumentar 30% su capacidad de carga generando mayor competitividad en los costos de sus productos (Promigas, 2019).

Es decir que la porción de vehículos de carga que funcionan a GNCV en Colombia es mínima respecto a los aún usan diésel y así, hay un gran mercado que se podría cubrir a futuro con estos automotores dedicados, si se plantean los estímulos adecuados. Incentivos que pueden estar alineados con la Responsabilidad Social Empresarial, por ejemplo, para que las organizaciones que requieren de flotas de transporte de carga en su operación disminuyan la huella de carbono y las emisiones de material particulado que generan, haciéndoles ver que es posible así también asegurar crecimiento económico, desarrollo social y equilibrio ambiental, partiendo del cumplimiento de las disposiciones legales (ICONTEC, 2008).

Las opciones pueden ser variadas para incentivar el GNCV en los diferentes sectores, a parte de las ya mencionadas, también se pueden considerar normas de tránsito especial en las

ciudades, como poder transitar en zonas y horarios que normalmente les aplica pico y placa a los vehículos tradicionales, beneficios para facilitar el parqueo en lugares públicos o tarifas especiales en los parqueaderos públicos, establecer precios preferenciales para las revisiones técnico-mecánicas, completos programas de servicios postventa que den garantías a los clientes que convierten sus vehículos sobre el respaldo después de la conversión para fidelizarlos, entre otros. Lo ideal sería que todos los vehículos funcionaran con GNCV, pero también hay que recordar que la disponibilidad de reservas de gas natural en Colombia es una debilidad, como se vio en la sección 4.1.1.3 y por lo tanto se requiere una valoración precisa de la demanda que sería posible cubrir para diferentes escenarios de conversión o adquisición de vehículos funcionando con GNCV. Adicionalmente, para que los usuarios de vehículos usen GNCV, se requiere de incentivos apropiados.

Así, si la estrategia de crear estímulos que incrementen el parque automotor de vehículos a GNCV con mayores conversiones de vehículos livianos y con vehículos de carga dedicados, logra el éxito, se logrará ampliar y renovar el parque automotor de vehículos a gas natural y por ende se aumentará el consumo.

Los análisis DOFA y multicriterio realizados en este capítulo permitieron obtener el ranking de las once estrategias que se sugirieron, estableciendo la primera que sería la más efectiva e importante implementar para revertir la tendencia decreciente del consumo de GNCV en Colombia. Aquí la opinión de expertos de la industria fue trascendental, así como la formulación y ejecución del modelo de programación por objetivos, para llegar al resultado que se buscaba. Ahora, sería importante saber cuál será el impacto que tendría la estrategia en el mercado y por ello se procedió a evaluarlo.

5. IMPACTO DE IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIA SELECCIONADA

En este último capítulo se cuantificó y evaluó el impacto que tendría la implementación de la estrategia seleccionada de “crear estímulos que incrementen el parque automotor de vehículos a GNCV con mayores conversiones de vehículos livianos y con vehículos de carga”, sobre la tendencia decreciente que ha tenido el consumo de GNCV en los últimos años. A través de una Matriz de Cambio se describió una *realidad actual* y una *realidad objetivo* en relación con los estímulos para el uso del GNCV en vehículos livianos y de carga, y se evaluó el impacto generado por la transición entre las dos. Dicho impacto se cuantificó en términos económicos, para usuarios y empresarios, y en términos medioambientales y de salud.

5.1. Matriz de Cambio

Para evaluar el impacto de la implementación de la estrategia se partió de la realidad actual de la industria de GNCV, en la cual se relacionaron los estímulos que existen para el uso de este combustible y se analizaron diversas interacciones para el cambio entre antiguas y nuevas situaciones. Con una Matriz de Cambio, se caracterizaron cualidades de la gestión del cambio como: la factibilidad, la velocidad de ejecución y la mejor secuencia de los cambios propuestos.

En la elaboración de la Matriz de Cambio se estableció una *realidad actual*, que describe las situaciones existentes en torno a los estímulos que hay para el consumo de GNCV; y una *realidad objetivo*, que describe las situaciones deseadas hacia las cuales se está apuntando con la implementación de la estrategia seleccionada. Cada realidad se dividió en dos conjuntos de situaciones: i) de mercado, que refiere a las situaciones comerciales de la industria y ii) político/ambiental, que refiere a situaciones relativas al gobierno y al ambiente suscitadas por el uso de GNCV. A continuación se describe cada una de las realidades.

5.1.1. Realidad actual

En la *realidad actual*, dentro del mercado, se consideraron las siguientes situaciones existentes:

- La baja competitividad del GNCV con respecto a combustibles líquidos, que se ha presentado en los últimos años haciendo perder la ventaja al gas natural.
- El cierre de talleres de conversión y de estaciones de suministro que se ha dado por la falta de interés de usuarios en convertir sus vehículos.
- El desmonte de equipos en vehículos convertidos, producto de las malas experiencias que enfrentaron los usuarios que convirtieron vehículos.

En lo político/ambiental se consideraron las situaciones existentes:

- La existencia de programas de subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos que se han implementado por parte de los actores privados para estimular a los potenciales usuarios.
- La ausencia de beneficios por parte del gobierno para vehículos convertidos a GNCV.
- Las emergencias ambientales que se han presentado por la baja calidad del aire en las ciudades.
- Hay un compromiso con el acuerdo de Paris – COP 21 para contribuir a la emisión de gases efecto invernadero.

5.1.2. Realidad objetivo

En la *realidad objetivo*, dentro del mercado, se consideraron las situaciones deseadas:

- Aumento del consumo de GNCV, producto de aumentar el número de vehículos a GNCV.
- Aumento de vehículos que funcionen con GNCV, con más vehículos livianos convertidos y dedicados para el transporte de carga.
- Alta competitividad entre los precios de GNCV y combustibles líquidos.

- Aumento del número de talleres de conversión y de estaciones de suministro de GNCV.

En lo político/ambiental se consideraron las situaciones deseadas:

- Nuevos estímulos para el uso de GNCV, como directrices en materia de responsabilidad social para las empresas que usan vehículos de carga o para que los vehículos oficiales se conviertan a usar GNCV.
- Disminución de emisiones de gases efecto invernadero y contribución al compromiso con el acuerdo de París – COP 21.
- Disminución de material particulado para mejorar la calidad del aire y evitar las emergencias ambientales.

5.1.3. Matriz de Transición

Luego de definir las realidades actuales y las objetivo, se elaboró una Matriz de Cambio, como la que se ilustra en la Figura 14, en la que se plasmó el análisis realizado de la transición entre realidades. La *realidad actual* refleja un sistema inestable puesto que hay pocas prácticas con relaciones complementarias y hay contradicciones en lo político/ambiental, por ejemplo el hecho del desmonte de equipos en vehículos convertidos se complementa con el cierre de talleres de conversión y de estaciones de suministro, o que a pesar que ha habido programas de subsidios y financiamientos especiales se sigue presentando el cierre de talleres. Mientras que la *realidad objetivo*, presenta un sistema más estable, ya que tiene procesos con relaciones complementarias y sin contradicciones, por ejemplo el hecho que aumenten los vehículos derivará en el aumento del consumo de GNCV o que crear nuevos estímulos para el uso de GNCV se complementa con la disminución de emisiones contaminantes.

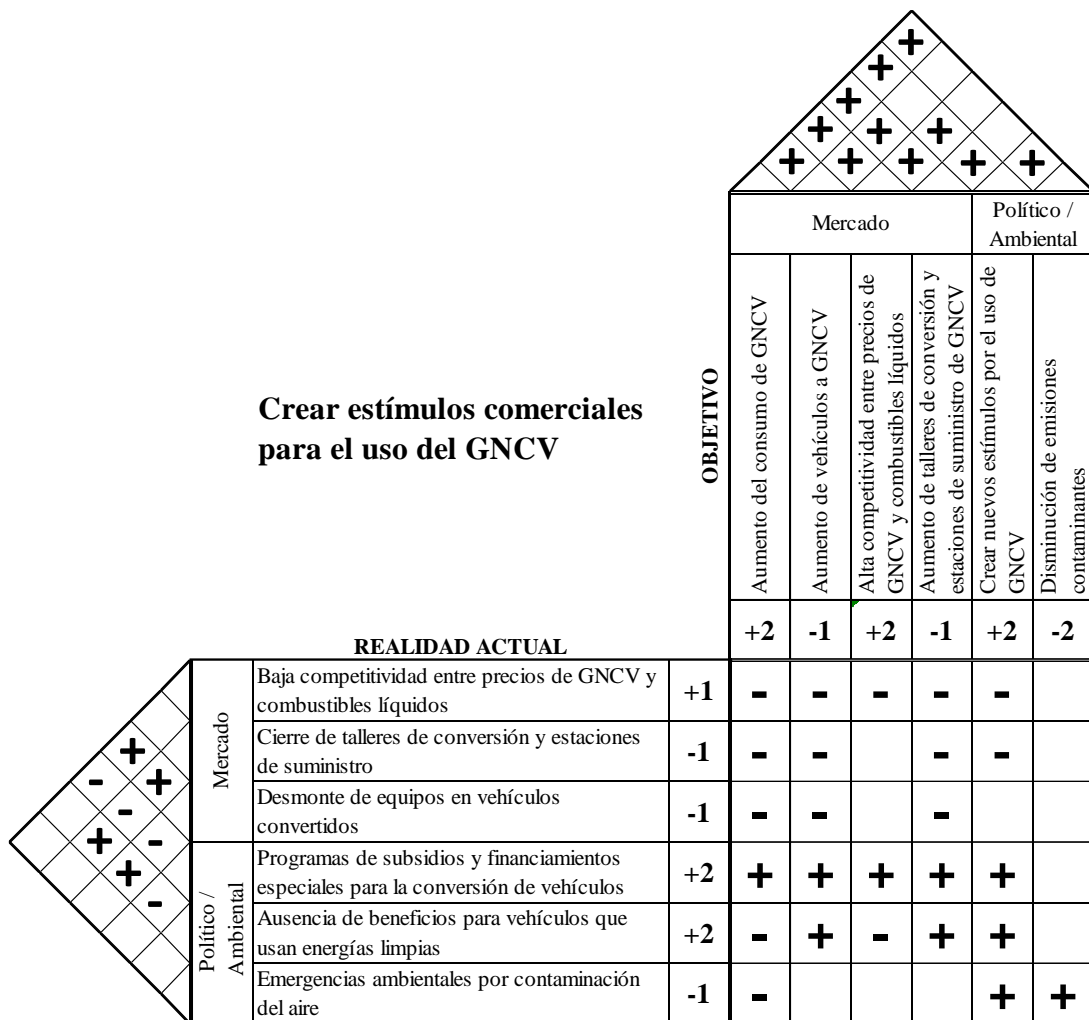


Figura 14. Matriz de Cambio. Elaboración propia.

De la Matriz de Cambio construida, resultó el análisis en cuanto a factibilidad, ejecución, ubicación y velocidad de implementación de la estrategia, como sigue a continuación.

5.1.4. Análisis

La *realidad objetivo*, a la que apunta la estrategia formulada es estable, puesto que tiene procesos con prácticas complementarias (relaciones positivas (+)), que se refuerzan entre sí y no tiene contradicciones o relaciones en competencia (relaciones negativas (-)).

En la *realidad actual* hay inestabilidad, puesto que hay pocas relaciones complementarias y hay contradicciones entre lo relacionado con los programas de subsidios y financiamientos

especiales para la conversión de vehículos y la realidad actual del mercado, que ha mostrado una baja competitividad de los precios del GNCV y disminución de las conversiones de vehículos. Esta inestabilidad permite concluir que a pesar de que las iniciativas sobre los programas de subsidios y financiamientos especiales han buscado incentivar la conversión de vehículos, la baja competitividad del precio del GNCV con respecto a los combustibles líquidos, previene a usuarios de hacer conversiones.

En cuanto a las situaciones ambientales que han suscitado emergencias, no se halla relación con otras situaciones actuales, ni complemento ni contradicción alguna.

También es posible observar una transición estable, en donde es más fácil hacer el cambio, desde el conjunto *político/ambiental*, de la realidad actual, hacia el conjunto *mercado*, de la realidad objetivo, que según los expertos son aspectos de gran importancia. Allí, las relaciones positivas (+) permiten determinar que los subsidios, financiamientos y otros beneficios para conversión de vehículos y uso de vehículos de carga dedicados a GNCV, derivarán en aumento de: parque automotor a GNCV, consumo de GNCV, talleres de conversión de automóviles y estaciones de suministro.

Con lo anterior se estimó que la factibilidad para hacer el cambio, en la implementación de la estrategia, es alta y se puede considerar iniciarla teniendo en cuenta (i) el hecho de que no hay beneficios para vehículos que usan GNCV, como privilegios de tránsito en zonas especiales, exención de *pico y placa* e impuestos; así como (ii) el hecho del desmonte de equipos en vehículos convertidos y (iii) el cierre de talleres de conversión y estaciones de suministro. Estas son tres situaciones que se refuerzan entre sí, pues están arrojando el mismo resultado: si no hay beneficios entonces no se estimula el uso de vehículos a GNCV y por ende los que tenían instalado el sistema lo desmontan, en los talleres no hay automóviles sobre los cuales trabajar y las estaciones no tienen

consumidores para suministrar el combustible. Aquí sería el primer aspecto donde hay que tomar acciones de implementación.

Por último, se pueden retomar las situaciones que se descartaron al principio y terminar el proceso de implementación con acciones en lo relacionado con la disminución de emisiones contaminantes, posibles programas de subsidios y financiamientos y una alta competitividad entre precios de combustibles.

En cuanto a la ubicación, se hizo referencia al aspecto cultural y de mentalidad actual sobre la industria del GNCV. La idea fue escoger entre un *campo verde – productivo* o *uno café – nuevo*, es decir que la implementación puede partir de algo que ya está funcionando (*campo verde*), retomando ciertas prácticas útiles, o se deberá hacer algo completamente nuevo (*campo café*), con nuevas estrategias y acciones (Brynjolfsson, Renshaw, & Alstytne, 1997).

Si bien la *realidad actual* muestra un sistema inestable, hay situaciones que reflejan aspectos positivos y de los cuales se puede partir hacia el cambio, es decir que no hay aspectos que cambiar completamente. Por ejemplo, se pueden tomar en consideración las iniciativas que han funcionado por parte de los privados para desarrollar programas de subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos, y conforme muestra la Matriz de Cambio, se nota que se debe motivar el uso de vehículos a GNCV, con estímulos más comerciales y políticas desde los gobiernos para que el transporte de carga use este combustible.

Para el ritmo y la naturaleza del cambio, dadas las condiciones actuales de la industria y del consumo de GNCV, este se daría de manera gradual o incremental, teniendo en cuenta la interdependencia de las tareas, receptividad organizacional al cambio y la presión externa. La interdependencia de las tareas o de acciones a cambiar es relativamente fácil puesto que se parte

de acciones que ya se han desarrollado, ya hay experiencia y cierta disposición en el sector respecto de ayudas o estímulos para usar GNCV y haría fácil una implementación en este sentido.

En cuanto a la receptividad organizacional, o para el caso, receptividad de la industria o del mercado, es una acción que podría ser difícil de implementar debido a la cultura que hay entorno al uso de GNCV, específicamente a la conversión de vehículos y los mitos que se han suscitado en este aspecto. La receptividad que se ha de tratar entonces será la que haya en el mercado, en los potenciales usuarios, esos conductores que desconfían de las conversiones y del rendimiento de sus automóviles con GNCV y allí se deberá sensibilizar y educar sobre los beneficios que este ofrece.

La presión externa se podría asociar con las tendencias políticas, los planes de desarrollo nacionales y los compromisos que se tienen como país para la reducción de los gases efecto invernadero y la contaminación del aire en las ciudades. También se deberán considerar las expectativas de impacto ambiental que genera la explotación para obtener nuevas reservas de gas natural.

Considerando lo anterior, teniendo en cuenta lo consultado con los expertos y lo analizado durante el análisis DOFA, el ritmo de implementación sería gradual y lento, puesto que si bien hay fortalezas y oportunidades en cuanto a las emisiones, precio y ventajas mecánicas que ofrece el uso del GNCV para llegar a un aumento de vehículos que consuman este combustible, también hay debilidades como la ausencia de políticas públicas para su estímulo o amenazas como surgimiento de otras energías alternativas para el transporte. Lo que puede generar la percepción en usuarios y quienes toman la decisión en políticas públicas, de que el gas natural no sea relevante para tenerlo en cuenta dentro de nuevas políticas y opciones energéticas en el sector transporte,

restándole competitividad y acrecentando la duda en los usuarios para decidirse a usar vehículos a GNCV.

5.1.5. Evaluación de las partes interesadas

Finalmente, la evaluación de las partes interesadas es la importancia de cada una de las situaciones, actuales y deseadas, y viene desde el análisis DOFA, en el cual se tuvo la oportunidad de encuestar a los stakeholders y de donde resultó la estrategia planteada. Durante ese ejercicio se validó lo mostrado en la Matriz de Cambio respecto a la ausencia de beneficios para vehículos que usan GNCV, que es un aspecto que resaltaron para el impulso del consumo y por ello se asignó la mayor importancia (de +2) a esta situación en la actualidad.

Dicha evaluación permitió inferir el interés por una implementación de la estrategia e impulsar el consumo de GNCV, entendiendo por partes interesadas a los actores principales de la industria, sin tener en cuenta los usuarios finales, puesto que en ellos el trabajo sería mayor porque hay que motivarlos y concientizarlos sobre los beneficios comunes y particulares por el uso del GNCV y por ello las situaciones deseadas sobre el aumento de talleres, de estaciones y de vehículos que funcionan con gas natural, presenta un nivel importancia bajo (-1) en la Matriz de Cambio.

La Matriz de Cambio señaló la importancia que tiene cada una de las situaciones para los stakeholders, y junto con la transición de *realidades* que se analizó, se notó una favorabilidad en la parte político/ambiental, en aspectos como subsidios, financiamientos y otros beneficios para conversión y uso de vehículos con energías limpias, para que desde allí se comience la implementación de la estrategia. Esto podría traducirse en el diseño de políticas públicas que consideren instrumentos como descuentos en impuestos, facilidades de parqueo en sitios públicos, precios especiales en revisión técnico-mecánica y directrices para el transporte de carga con

exigencias en materia ambiental, entre otras, que serían un buen complemento para acciones como estimular las conversiones a nivel de flotas corporativas o que se dicten directrices para que vehículos oficiales operen con GNCV.

5.2. Cuantificación del Impacto

Luego de haber evaluado el impacto desde la perspectiva de la Matriz de Cambio, se procedió a estimar su cuantificación, para lo cual se tuvo en cuenta que la estrategia partió de la fortaleza que hay en el hecho que el mantenimiento de vehículos que funcionan a GNCV es más fácil y que por lo tanto las estrategias comerciales llevarían a explotar la oportunidad de ampliar y renovar el parque automotor de vehículos de este combustible y contribuir con el aumento en el consumo. Dichas iniciativas podrán venir principalmente de los empresarios involucrados, tanto para la conversión de vehículos como para implementar vehículos dedicados para transporte de carga, y así atraer usuarios a los cuales se les resalte la idea que el motor de sus vehículos se verá beneficiado por el uso del combustible y las empresas pueden ver una oportunidad para acogerse a políticas y estándares de responsabilidad social, en este caso contribuyendo al mejoramiento ambiental. También podrían tener injerencia los empresarios que hacen parte del suministro de gas natural y los entes gubernamentales.

Para evaluar la estrategia vale la pena retomar la oportunidad que tiene el GNCV en Colombia, que en algunos momentos ha sido una fortaleza, de adoptar programas de subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos. Este aspecto, tal como está planteado, se puede asemejar a las eventuales estrategias que se han de implementar teniendo en cuenta que los subsidios o financiamientos especiales pueden hacer parte, junto con otros estímulos, de estas tácticas comerciales.

En la más reciente época en la que el gremio se unió para incentivar el uso de GNCV con la financiación de la conversión de vehículos, y en la vigencia del *fondo de conversiones* de Ecopetrol y TGI, las conversiones de vehículos a GNCV aumentaron 19% en Colombia en el primer semestre del año 2018, llegando al número de 9.421 carros que pasaron de usar gasolina a gas natural.

Con lo anterior se puede inferir que revertir la curva decreciente de los últimos años, aumentando el número de vehículos que funcionan a GNCV y por ende su consumo, se logrará con los estímulos que hasta el momento han funcionado, junto la creación de otros beneficios en los que redoblen esfuerzos las empresas privadas y el gobierno. Dichos estímulos deberán tomar en cuenta aspectos mecánicos relativos al mantenimiento y vida útil de los motores de los vehículos y la correcta instalación de los equipos de conversión; pero también otros aspectos como los anteriormente mencionados y relacionados con políticas públicas, que puedan estar alineados con responsabilidad social y beneficios para el tránsito de estos automotores.

Revisando la opinión de los stakeholders, la mayoría de ellos concordaron en que las estrategias comerciales es lo primero que se debe implementar para alcanzar el objetivo propuesto. Expertos del MinCIT, Terpel, Icontec, Naturgas y Talleres de conversión, colocaron la estrategia FO3 como la primera o la segunda dentro de un ejercicio de priorización respecto a las demás estrategias que les fueron expuestas. Dentro de sus apreciaciones, ellos plantearon aspectos como:

- Que se necesitan los estímulos comerciales para que la gente se motive a usar el GNCV, hay que ser activos para convencerlos.
- Que los estímulos deben ser tan superiores que diriman factores como el precio del GNCV y que independientemente de este, se mantenga el deseo de usar vehículos con gas natural.

- Que los estímulos que han existido para la conversión de vehículos han funcionado bien para la industria y actualmente el parque automotor a gasolina aun es alto, por lo tanto se da la oportunidad de aumentar los vehículos convertidos y así el consumo de GNCV.
- Que la gente ha desconfiado del uso del GNCV por el resultado de las conversiones y que estas les han generado malas experiencias, pero que ahora hay marcas de automóviles que ya cuentan con vehículos dedicados desde fábrica sólo que hay desconocimiento en los usuarios.
- Que los usuarios que convierten a GNCV lo hacen por ahorro, solo por el diferencial de precios, pero con otros estímulos se podría lograr también, como convenios para realizar conversiones a flotas de vehículos a nivel corporativo, ofreciendo servicios con beneficios de respaldo, soporte postventa y garantías de marca, o recibir beneficios por atender estándares de responsabilidad social empresarial a nivel ambiental. Los estímulos comerciales es algo que incumbe más a los privados.
- Que el hecho de contar con personal calificado, da confianza sobre la calidad de las conversiones.

Lo anterior resume factores como ventajas para el motor, ahorro, calidad y vehículos dedicados, que son relevantes, que se podrían tener en cuenta dentro las estrategias comerciales que se implementen y que según los expertos son determinantes para la decisión de los potenciales usuarios a usar GNCV. Se puede concluir que hay bases e información para crear los estímulos para vehículos livianos y que se puede ampliar hacia el transporte de carga, resaltando que hay otros beneficios más allá del ahorro, como los mecánicos y contribuir a estándares ambientales y de responsabilidad social empresarial.

En cuanto a inversión, la implementación de estos estímulos comerciales dependerá mucho de los agentes privados de la cadena y sus negociaciones, pero el costo podría ser marginal debido a que gran parte de la inversión sería en recurso humano, y estaría representado en el costo de

pagarle a los profesionales que diseñen y promuevan las motivaciones comerciales, cuyos perfiles estarán enmarcados en el conocimiento y experticia de la industria del GNCV y también en temas de mercadeo. Se deberán conformar equipos multidisciplinarios de acuerdo a la capacidad de cada agente interesado y los costos serán concernientes a los honorarios y otros relativos a los mismos (gastos de representación, de desplazamiento, entre otros). En cuanto a tiempo, según los expertos, se estima que una implementación de estas podría tomar entre 1 y 6 meses.

Así, según aproximaciones con los expertos consultados, en el caso de un taller de conversión que invertiría alrededor de \$9.000.000 mensuales para crear, desarrollar y mantener estrategias comerciales y que estaría dispuesto a invertir por cada conversión un valor de \$300.000, requeriría llevar a cabo 31 nuevas conversiones mes a mes. Entonces si el taller llega a convertir más de 30 vehículos mensuales significa que la estrategia sugerida si funciona y así, con los más de 90 talleres que hay en Colombia, por mes se tendrían más de 2.790 vehículos nuevos a GNCV y al año más de 33.000, que también van a contribuir con el aumento del consumo de gas natural. La

Tabla 15 muestra el cálculo estimado que cuantifica el impacto de la estrategia para el caso de un taller de conversión.

En concordancia con lo anterior y revisando el boletín estadístico de la UPME (UPME, 2016), se tiene que el promedio mensual de consumo de GNCV entre 2012 y 2015 por vehículo convertido, fue de 31 MBTUD y el número de vehículos convertidos aumentaba en promedio 2788 unidades. Así, con la expectativa de crecimiento de la estrategia propuesta, se deberán convertir mes a mes en promedio más de 2790 vehículos para alcanzar un consumo de 87 GBTUD mensuales de gas natural vehicular, consumo que crecerá con el hecho que los vehículos mantengan la conversión y que nuevos vehículos se pasen a GNCV.

Tabla 15. Cálculo estimado del impacto sobre un taller de conversión. Elaboración propia.

Personas		2
Honorarios por persona al mes	\$	4,000,000
Tiempo (meses)		1
Subtotal	\$	8,000,000
Imprevistos (%)		10%
Subtotal imprevistos	\$	800,000
Total	\$	8,800,000
Inversión por conversión, en mercadeo	\$	300,000
# de conversiones necesarias		29
tiempo para retorno de la inversión		1
# de conversiones al mes		29
Talleres en Colombia		90
Vehículos a convertir mensualmente por taller		31
Total nacional de vehículos que convertirían al mes		2,790
Meses al año		12
Total nacional de vehículos que convertirían al año		33,480

En cuanto al impacto que puede generar el transporte de carga, se plantea un escenario en el que éste alcance la misma proporción de vehículos a GNCV que tiene los vehículos livianos convertidos actualmente, la cual es de alrededor del 10% cómo se revisó en la sección 1. Es decir que de los más de 370.000 vehículos de carga que hay en Colombia (Ministerio de Transporte, 2019), llegaran a haber 37.000 dedicados a GNCV, y de acuerdo con los datos consumo que indican que cada automotor de estos consume alrededor de 5.000 m³ al mes (Promigas, 2018), se alcanzaría un consumo mensual de 185 millones de m³. En el siguiente gráfico se observa un estimado del consumo comparativo entre vehículos de carga y livianos a GNCV, allí se evidencia la diferencia que se puede llegar a presentar si el número de vehículos que usan este combustible fuera equivalente.

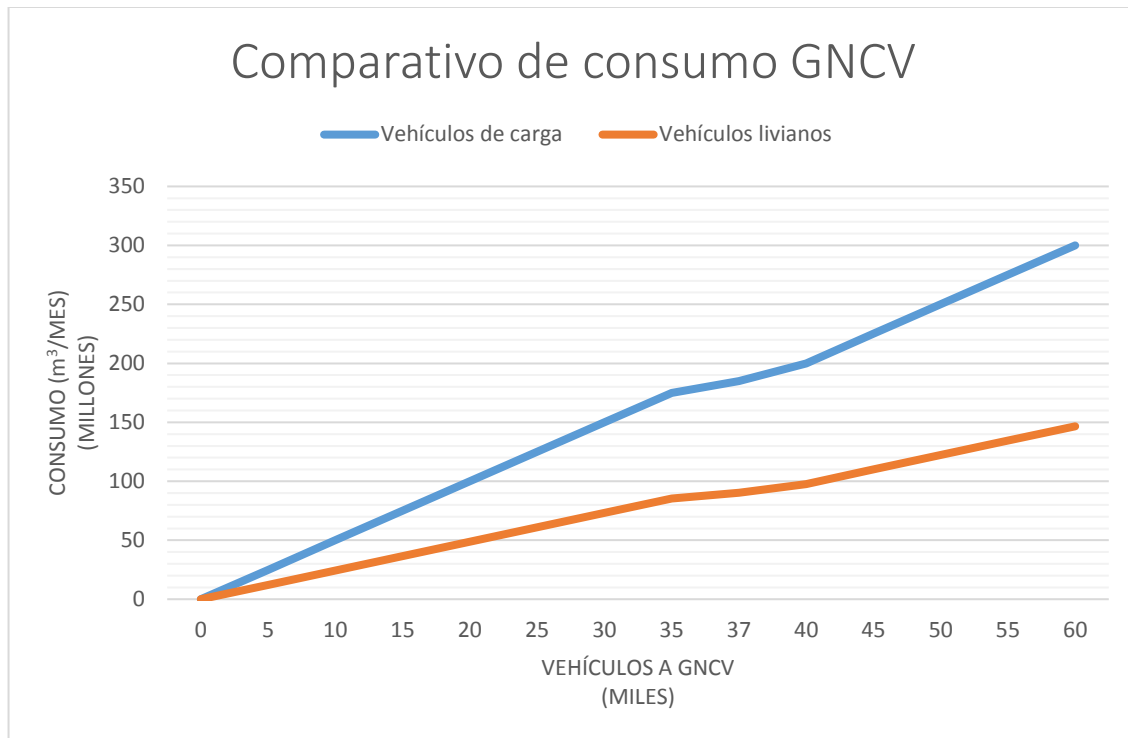


Figura 15. Comparativo de consumo de vehículos a GNCV. (Elaboración propia basada en datos de la UPME y CONCENTRA)

En los aspectos ambiental y de salud pública, el impacto estará sobre las consecuencias ocasionadas por la mala calidad del aire, la cual se ha sentido más en ciudades como Bogotá y Medellín, en donde se han emitido alertas naranja a roja por efectos de la contaminación luego que se confirmaran altos niveles de unidades de material particulado – PM, convirtiéndose en una situación que podría afectar de manera negativa la salud de los ciudadanos y por lo que se implementaron medidas para contrarrestar el problema. Una de esas medidas fue el pico y placa ambiental para reducir los niveles de emisiones de gases en el aire y así lograr reducir la concentración de PM en el ambiente (Puentes, 2019).

En el mundo, los datos sobre salud reflejan que la contaminación del aire ha causado 3,7 millones de muertes *prematuras*, mientras que en Colombia las cifras son de 10.527 decesos (160% más que los generados por el conflicto armado), ha ocasionado gastos equivalentes al 1,93% del producto interno bruto – PIB y 67,8 millones de síntomas y enfermedades relacionados,

según el reporte de indicadores de Naturgas del año 2018 (Asociación Colombiana de Gas Natural, 2018). Estas cifras son un referente relevante para medir el impacto de las estrategias que se emprendan para el cuidado del aire y la consecuente disminución de la contaminación, y el impacto de la solución sugerida en este estudio busca incidir directamente sobre la corrección de estos indicadores.

En este sentido, se podría dar un aumento de vehículos que consumen GNCV reemplazando los que funcionan con gasolina y diésel, y con esto se lograría la disminución de material particulado y el mejoramiento la calidad del aire. En consecuencia, se puede llegar mantener índices de calidad del aire (ICA) máximo de 100, es decir un nivel moderado como lo ilustra la Tabla 16, lo que evitará que se tomen medidas por parte de los Gobiernos, como las de pico y placa ambiental en las ciudades, lo que demostrará que la implementación de los estímulos para el uso del GNCV también contribuye de manera positiva sobre aspectos ambientales y de salud pública.

Tabla 16. Tabla de Índice de Calidad del Aire – ICA. (Contaminación del aire en Bogotá, 2019).

ICA	Calidad del Aire	Efectos
0 – 50	Buena	No se anticipan impactos a la salud cuando la calidad del aire se encuentra en este intervalo.
51 – 100	Moderada	Las personas extraordinariamente sensitivas deben considerar limitación de los esfuerzos físicos excesivos y prologados al aire libre.
101 – 150	Dañina a la salud de los grupos sensitivos	Los niños y adultos activos, y personas con enfermedades respiratorias tales como el asma, deben evitar los esfuerzos físicos excesivos y prolongados al aire libre.
151 – 200	Dañina a la salud	Los niños y adultos activos, y personas con enfermedades respiratorias tales como el asma, deben evitar los esfuerzos excesivos prolongados al aire libre; las demás personas, especialmente niños, deben limitar los esfuerzos físicos excesivos y prolongados al aire libre.
201 – 300	Muy dañina a la salud	Los niños y adultos activos, y personas con enfermedades respiratorias tales como el asma, deben evitar todos los esfuerzos excesivos al aire libre; las demás personas, especialmente los niños, deben limitar los esfuerzos físicos excesivos al aire libre.
300 +	Arriesgado	

Con lo visto en este capítulo se concluye que la evaluación del impacto, desde la perspectiva de la Matriz de Cambio, indica que es factible el cambio con la estrategia de crear nuevos estímulos para el uso del GNCV y a pesar de que puede ser lenta, los stakeholders la consideran viable y con la ventaja que no se debe partir de cero. Adicionalmente, se justifica su implementación en términos cuantificados debido a los beneficios económicos, para empresarios y usuarios, ambientales y de salud pública.

CONCLUSIONES

El análisis de resultados indicó que una estrategia que considere *crear estímulos que incrementen el parque automotor de vehículos que usan este combustible, y renovarlo, con mayores conversiones de vehículos livianos y con vehículos de carga dedicados*, es la más apropiada para el entorno Colombiano, y que para su implementación se requiere del aporte, tanto del sector privado como del Gobierno Nacional.

En la actualidad los automotores son grandes contribuyentes de emisiones contaminantes, de gases efecto invernadero y de material particulado que deteriora la calidad del aire, afectan la salud de la población y contribuyen negativamente al cambio climático mundial, lo que requiere alternativas de combustibles que reemplacen los líquidos tradicionales como el diésel y la gasolina. Una de estas alternativas es el GNCV, que además puede ofrecer otras ventajas para los usuarios relativas a aspectos mecánicos y económicos.

Este estudio permitió seleccionar, entre 11 estrategias identificadas a partir de un análisis integrado DOFA-multicriterio y *Goal Programming*, la estrategia más apropiada para incrementar el consumo de GNCV en el país. Dicha estrategia consiste en *crear estímulos que incrementen el parque automotor de vehículos que usan GNCV, y renovarlo con mayores conversiones de vehículos livianos y con vehículos de carga dedicados*. Es importante señalar que la implementación de esta estrategia requiere el concurso tanto del sector privado como del Gobierno Nacional. El análisis sugiere que para su implementación se debe partir de la ventaja que representa el fácil mantenimiento de vehículos que operan a GNCV y para tener más conversiones de vehículos se deben resaltar otros beneficios relativos a buenos servicios postventa, garantías, precios competitivos y fidelización de clientes.

Así mismo, se da una gran oportunidad para renovar el transporte de carga, sector en el que apenas se están pensando en usar el GNCV y para ello serán relevantes las directrices que deba impartir el Gobierno fundamentadas en el impacto ambiental, y que por parte de las empresas que pueden ver allí la oportunidad de ajustarse a estándares de responsabilidad social.

Actualmente los incentivos en la industria del GNCV por parte del sector privado se han establecido a través fondos especiales para subsidiar y financiar la conversión de vehículos, mientras que por parte del gobierno, se tiene estipulado un impuesto a las ventas y gravámenes arancelarios para importación en kits de conversión, componentes, equipos para planes de gas natural vehicular y vehículos dedicados del 5%.

Se propone complementar la estrategia seleccionada con dos estrategias suplementarias, seleccionadas de acuerdo con la priorización definida mediante *goal programming*: (i) *controlar los precios del gas*, y (ii) *adoptar un sistema de subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos*, que implica la creación de incentivos para los usuarios.

La estrategia seleccionada y las suplementarias que le sirven de apoyo, requieren para su implementación acciones específicas:

1. Es importante que las conversiones de los vehículos a GNCV se hagan bajo el cumplimiento de especificaciones técnicas que aseguren su calidad. Una de las causas de la caída del consumo identificadas en este estudio, es la falta de seguimiento a las normas técnicas que regulan la materia, lo que se ha traducido en desconfianza de los usuarios para usar y mantener el consumo de GNCV. En consecuencia, es necesario aprovechar la normatividad ya establecida y asegurar su cumplimiento.
2. Es necesario el diseño de políticas públicas que consideren instrumentos como descuentos en impuestos, facilidades de parqueo en sitios públicos, precios especiales

en revisión técnico-mecánica, directrices para el transporte de carga con exigencias en materia ambiental, entre otros. Es decir, los estímulos comerciales que surgen como iniciativa de los privados, deben complementarse con las políticas públicas especiales para los vehículos que funcionen a GNCV.

3. Es necesario garantizar el abastecimiento de GNL en el largo plazo para asegurar la disponibilidad de gas natural en el mercado interno, teniendo en consideración las pocas reservas con que cuenta el país. Este es un aspecto importante para dar confiabilidad a los usuarios sobre la sostenibilidad del uso de GNCV, porque se pueden crear todos los estímulos, estos pueden dar los mejores resultados y la gente se decide a usar masivamente la tecnología, pero ellos deben ver y saber que su inversión va a perdurar por varios años, y si no hay seguridad de suministro la estrategia no funcionará.

El resultado del análisis DOFA contempló amenazas en la capacidad operativa para la vigilancia y el control, dada la normatividad que hay para la industria del GNCV, lo que sugiere también que las regulaciones y normas que hay para este sector es una más de las fortalezas que puede garantizar la sostenibilidad de la industria en el tiempo. Así mismo, en esta matriz DOFA se trató la oportunidad de aumentar y renovar el parque automotor con más vehículos a GNCV, entre ellos los vehículos dedicados, livianos, de transporte masivo y de carga, lo cual se podría estimar como una más de las debilidades que hacen parte de este análisis DOFA. Ahora bien, otra amenaza que no se contempló en este estudio es quizás la de combustibles sustitutos que puedan surgir como energías alternativas para vehículos de transporte terrestre en Colombia y que es un tema interesante de evaluar, como es el caso de automóviles eléctricos (Reinemer, 2018).

El impacto potencial de la implementación de la estrategia propuesta indica que es un proceso factible que, aunque puede ser lento, justifica su implementación en términos económicos, desde el punto de vista de empresarios y usuarios, ambientales y de salud pública.

Una implementación exitosa de la estrategia sugerida tiene el potencial para asegurar más de 2700 vehículos convertidos mensualmente, que significan alrededor de 30 conversiones por cada taller y que representarían un consumo de 87 GBTUD de GNCV. También se daría el escenario que llegaran a haber 37.000 vehículos de carga dedicados a GNCV que alcanzarían un consumo mensual de 185 millones de m³. En materia de salud pública, se evitarán las muertes que causa la contaminación en Colombia por enfermedades respiratorias.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia EFE. (5 de Abril de 2017). Colombia dispone de reservas de gas natural hasta 2025. *El País*.
- Ahumada, Ó. (4 de Octubre de 2018). Las razones para que el año entrante suba el precio del gas. *El Tiempo*.
- Ancona, M., Bianchi, M., Branchini, L., Pascale, A. D., Melino, F., Mormile, M., & Palella, M. (2018). On-site LNG production at filling stations. *Applied Thermal Engineering*, 142-153.
- ANDEMOS. (2017). *Inventario de Emisiones Vehículos Colombia*. Bogotá D.C.: ANDEMOS.
- ANDEMOS. (2020). *Informe Vehículos HEV, PHEV y BEV*.
- Ángel Reinemer, J. M. (1 de Abril de 2018). Evaluación de factores socioeconómicos y técnicos que afectan la aplicación del vehículo eléctrico en Colombia. *Trabajo de Grado*. Chía, Cundinamarca, Colombia: Universidad De La Sabana.
- AnkeMeyer-Baese, & VolkerSchmid. (2014). Pattern Recognition and Signal Analysis in Medical Imaging (Second Edition). En AnkeMeyer-Baese, & VolkerSchmid, *Pattern Recognition and Signal Analysis in Medical Imaging (Second Edition)* (págs. 291-323). Academic Press.
- Arsić, S., Nikolić, D., & Živković, Ž. (2017). Hybrid SWOT - ANP - FANP model for prioritization strategies of sustainable development of ecotourism in National Park Djerdap, Serbia. *Forest Policy and Economics*, 11-26.
- Asociación Colombia de Gas Natural - Naturgas. (2018). Obtenido de <http://www.naturgas.com.co/content/sigue-aumentando-la-brecha-entre-los-precios-de-la-gasolina-y-los-del-gas-natural-vehicular>
- Asociación Colombiana de Gas Natural - Naturgas. (8 de Agosto de 2018). *Sigue Aumentando la brecha entre los precios de la Gasolina y los del Gas Natural Vehicular*. Obtenido de <http://www.naturgas.com.co>
- Asociación Colombiana de Gas Natural. (2018). *Visión Sectorial del Gas Natural en Colombia*. Bogotá.
- Berry, T. (s.f.). *What Is a SWOT Analysis?* Obtenido de <https://articles.bplans.com>
- Brynjolfsson, E., Renshaw, A. A., & Alstyn, M. V. (1997). The Matrix of Change. *Sloan Management Review*, 37-54.
- Burnham, A. (2020). *Alternative Fuel Life-Cycle Environmental and Economic Transportation (AFLEET) Tool 2019*.
- Cai, H., Burnham, A., Chen, R., & Wang, M. (2017). Wells to wheels: Environmental implications of natural gas as a transportation fuel. *Energy Policy*, 565-578.
- Celia. (2017). *Precio del gas 'boca de pozo' debe tener un límite para evitar disminución en demanda*. Obtenido de La FM: <https://www.lafm.com.co/economia/antonio-celia-precio-del-gas-boca-pozo-limite-evitar-disminucion-la-demanda>
- Chang, H.-H., & Huang, W.-C. (2006). Application of a quantification SWOT analytical method. *Mathematical and Computer Modelling*, 158-169.
- CIA World Factbook. (1 de Enero de 2015). *IndexMundi*. Obtenido de www.indexmundi.com
- CIA World Factbook. (1 de Enero de 2018). *Importaciones de gas natural*. Obtenido de www.indexmundi.com

- CIA World Factbook. (1 de Enero de 2018). *Reservas comprobadas de gas natural*. Obtenido de <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/273rank.html>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG. (12 de 02 de 2003). Resolución 011. *Por la cual se establecen los criterios generales para remunerar las actividades de distribución y comercialización de gas combustible, y las fórmulas generales para la prestación del servicio público domiciliario de distribución de gas combustible*.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG. (14 de Agosto de 2013). Resolución por la cual se libera el precio del gas natural puesto en Punto de Entrada al Sistema Nacional de Transporte. *Resolución No. 088 DE 2013*. Bogotá, D.C., Colombia.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG. (2018). *Historia en Colombia*. Obtenido de <http://www.creg.gov.co/sectores-que-regulamos/gas-natural/historia-en-colombia>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (11 de Abril de 2000). Resolución No. 023 de 2000. *Por la cual se establecen los Precios Máximos Regulados para el gas natural colocado en Punto de Entrada al Sistema Nacional de Transporte, y se dictan otras disposiciones para la comercialización de gas natural en el país*. Bogotá, D.C., Colombia.
- Cómo funciona un auto.* (s.f.). Obtenido de <https://www.comofuncionaunauto.com/illustrations/transverse-engine>
- Concentra - Inteligencia en Energía. (2018). *Evolución y Caracterización del Gas Natural Comprimido en Colombia*. Bogotá.
- Concentra. (2018). *Cifras Consolidadas*. Bogotá.
- Concentra. (2018). *Fracking, una opción para asegurar el abastecimiento de gas natural*. Bogotá.
- Concentra. (2020). *Gas Natural en Colombia - Cifras Consolidadas 2019*. Bogotá D.C.: Concentra - Inteligencia en Energía.
- Congreso de Colombia. (29 de 12 de 2016). LEY 1819 DE 2016. *Reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones*.
- Congreso de Colombia. (11 de Julio de 2019). POR MEDIO DE LA CUAL SE PROMUEVE EL USO DE VEHICULOS ELECTRICOS EN COLOMBIA Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES. *Ley 1964*.
- Congreso de la República de Colombia. (29 de Diciembre de 2016). Ley por medio de la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones. *Ley 1819 de 2016*. Bogotá, D.C., Colombia.
- Contaminación del aire en Bogotá*. (2019). Obtenido de <https://aqicn.org/map/bogota/es/>
- CREG. (2012). *Revisión de la regulación de precios de gas natural en Colombia*.
- Departamento de Planeación Nacional. (31 de Julio de 2018). Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire. *Documento CONPES*. Bogotá, D.C., Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación. (2003). *Documento CONPES 3244 - ESTRATEGIAS PARA LA DINAMIZACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DEL SECTOR DE GAS NATURAL EN COLOMBIA*. Bogotá D.C.
- Diario El Espectador. (4 de Julio de 2018). Conversiones de vehículos a gas natural han crecido 131%. *El Espectador*.
- Diario El Nuevo Siglo. (29 de Abril de 2015). Precios del gas suben por culpa del dólar. *El Nuevo Siglo*.
- Dodgson, J., Spackman, M., Pearman, A., & Phillips, L. (2009). *Multi-criteria analysis : a manual*. Londres.

- Ecopetrol. (3 de Mayo de 2017). *Ecopetrol*. Obtenido de <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/boletines-2017/boletines-2017/descubrimiento-exploratorio-Gorgon>
- Ervural, B. C., Zaim, S., Demirel, O. F., Aydin, Z., & Delen, D. (2018). An ANP and fuzzy TOPSIS-based SWOT analysis for Turkey's energy planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1538-1550.
- Ervural, B., Zaim, S., Demirel, O., Aydin, Z., & Delen, D. (2018). An ANP and fuzzy TOPSIS-based SWOT analysis for Turkey's energy planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1538-1550.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D., . . . Dorland, R. (2007). CHANGES IN ATMOSPHERIC CONSTITUENTS AND IN RADIATIVE FORCING. En *AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis*.
- GasExpress Vehicular. (12 de 2017). *Verdades y Mentiras sobre el gas natural*. Obtenido de Gasexpress: <http://gasexpress.com.co/verdades-y-mentiras-sobre-el-gas-natural/>
- Gobierno de Colombia. (2019). ESTRATEGIA NACIONAL DE MOVILIDAD ELÉCTRICA.
- Gómez-Luna, E., Fernando-Navas, D., Aponte-Mayor, G., & Betancourt-Buitrago, L. A. (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *DYNA*, 157-163.
- Goyal, P., & Sidhartha. (2003). Present scenario of air quality in Delhi: a case study of CNG implementation. *Atmospheric Environment*, 5423-5431.
- Grupo Vanti. (2017). *Informe de Sostenibilidad*. Bogotá D.C.
- Grupo Vanti. (2019). *Informe de Sostenibilidad*. Bogotá D.C.
- Hao, H., Liu, Z., Zhao, F., & Li, W. (2016). Natural gas as vehicle fuel in China: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 521-533.
- He, T., Karimi, I. A., & Ju, Y. (2018). Review on the design and optimization of natural gas liquefaction processes for onshore and offshore applications. *Chemical Engineering Research and Design*, 89-114.
- Heidy, M. (12 de Septiembre de 2018). Preocupación por incertidumbre en abastecimiento de gas natural. *La República*.
- Hill, T., & Westbrook, R. (1997). SWOT Analysis: It's Time for a Product Recall. *Long Range Planning*, 46-52.
- Hu, N., Liu, S., Gao, Y., Xu, J., Zhang, X., Zhang, Z., & Lee, X. (2018). Large methane emissions from natural gas vehicles in Chinese cities. *Atmospheric Environment*, 374-380.
- ICONTEC. (25 de 06 de 2008). Guía Técnica Colombiana 180. *Guía sobre Responsabilidad Social*.
- ICONTEC. (24 de 10 de 2018). NTC 4830:1. *COMPONENTES DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE PARA VEHÍCULOS QUE FUNCIONAN CON GAS NATURAL COMPRIMIDO. PARTE 1: DEFINICIONES Y REQUISITOS GENERALES*. ICONTEC.
- Imran Khan, M., Yasmin, T., & Shakoor, A. (2015). Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 785-797.
- Jack, H. (2013). Engineering Design, Planning, and Management. En H. Jack, *Engineering Design, Planning, and Management* (págs. 171-214). Academic Press.
- Joaquim Rovira, J. L. (2020). Air quality, health impacts and burden of disease due to air pollution (PM10, PM2.5, NO2 and O3): Application of AirQ+ model to the Camp de Tarragona County (Catalonia, Spain). *Science of The Total Environment*.

- Kagiri, C., Zhang, L., & Xia, X. (2017). Optimization of a compressed natural gas station operation to minimize energy cost. *Energy Procedia*, 2003-2008.
- Kajanus, M., Leskinen, P., Kurttila, M., & Kangas, J. (2012). Making use of MCDS methods in SWOT analysis—Lessons learnt in strategic natural resources management. *Forest Policy and Economics*, 1-9.
- Kakaee, A.-H., & Paykani, A. (2013). Research and development of natural-gas fueled engines in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 805-821.
- Kazemi, F., Abolhassani, L., Rahmati, E. A., & Sayyad-Amin, P. (2018). Strategic planning for cultivation of fruit trees and shrubs in urban landscapes using the SWOT method: A case study for the city of Mashhad, Iran. *Land Use Policy*, 1-9.
- Khan, I. M. (2018). Evaluating the strategies of compressed natural gas industry using an integrated SWOT and MCDM approach. *Journal of Cleaner Production*, 1035-1052.
- Khan, M. (2017). Identifying and addressing barriers for the sustainable development of natural gas as automotive fuel. *International journal of hydrogen energy*, 25453-25473.
- Khan, M. I., Shahrestani, M., Hayat, T., Shakoor, A., & Vahdati, M. (2019). Life cycle (well-to-wheel) energy and environmental assessment of natural gas as transportation fuel in Pakistan. *Applied Energy*, 1738-1752.
- Khan, M. S., Effendy, S., Karimi, I., & Wazwaz, A. (2019). Improving design and operation at LNG regasification terminals through a corrected storage tank model. *Applied Thermal Engineering*, 344-353.
- King, H. M. (s.f.). *Oil and Gas*. Obtenido de www.geology.com
- Kirk, J., Bristow, A., & Zanni, A. (2014). Exploring the market for Compressed Natural Gas light commercial vehicles in the United Kingdom. *Transportation Research Part D*, 22-31.
- 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*, 178-188.
- Krellinga, C., & Badami, M. G. (2016). Operational and financial performance of Delhi's natural gas-fueled public bus transit fleet: A critical evaluation. *Transport Policy*, 178-188.
- Kurttila, M., Pesonen, M., Kangas, J., & Kajanus, M. (2000). Utilizing the analytic hierarchy process (AHP) in SWOT analysis — a hybrid method and its application to a forest-certification case. *Forest Policy and Economics*, 41-52.
- Lee, S., & Walsh, P. (2011). SWOT and AHP hybrid model for sport marketing outsourcing using a case of intercollegiate sport. *Sport Management Review*, 361-369.
- Li, Y., Cui, Q., Li, C., Wang, X., Cai, Y., Cui, G., & Yang, Z. (2017). An improved multi-objective optimization model for supporting reservoir operation of China's South-to-North Water Diversion Project. *Science of The Total Environment*, 970-981.
- Liang, H., Ren, J., Lin, R., & Liu, Y. (2019). Alternative-fuel based vehicles for sustainable transportation: A fuzzy group decision supporting framework for sustainability prioritization. *Technological Forecasting & Social Change*, 33-43.
- Melgarejo, C. (06 de Febrero de 2020). Declaran alerta amarilla en zonas de Bogotá por calidad del aire. *El Tiempo*.
- Mello, P., Pelliza, G., Catalun, R., & da Silva, R. (2006). Evaluation of the maximum horsepower of vehicles converted for use with natural gas fuel. *Fuel*, 2180-2186.
- Metro de Medellín. (03 de 04 de 2018). *Noticia No. 1607*. Obtenido de <https://www.metrodemedellin.gov.co/al-d%C3%ADa/noticias-metro/artmid/6905/articleid/462/la-l237nea-1-de-buses-del-metro-cuenta-con-primer-bus-el233ctrico-articulado>

- Metrocali. (27 de 05 de 2019). *Boletín No. 48*. Obtenido de <https://www.metrocali.gov.co/wp/metro-cali-abre-licitacion-para-adquirir-en-concesion-109-buses-electricos/>
- Metrocali. (01 de 03 de 2019). *EL MIO CUMPLE 10 AÑOS DE OPERACIÓN, MÁS DE 1.208 MILLONES DE PASAJEROS HA MOVILIZADO EL SISTEMA*. Obtenido de <https://www.metrocali.gov.co/wp/el-mio-cumple-10-anos-de-operacion-mas-de-1-208-millones-de-pasajeros-ha-movilizado-el-sistema/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. (5 de Junio de 2008). Resolución 910 de 2008. *Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres*. Bogotá, D.C., Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Minambiente*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Memoria justificativa. *Proyecto resolución: Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres*. Bogotá, D.C., Colombia.
- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (21 de Marzo de 2012). Reglamento Técnico aplicable a procesos, equipos y Talleres de Conversión a Gas Natural Comprimido para uso Vehicular. *Resolución 0957 de 2012*. Bogotá, D.C., Colombia.
- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (13 de 11 de 2019). Decreto 2051. *Por el cual se modifica parcialmente el Arancel de Aduanas*.
- Ministerio de Minas y Energía. (4 de Abril de 2017). Reglamento Técnico aplicable a Estaciones de Servicio que suministran Gas Natural Comprimido para uso Vehicular. *Resolución 40278 de 2017*. Bogotá, D.C., Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía. (Marzo de 2020). *Histórico de Noticias Minenergía*. Obtenido de Reservas probadas de petróleo en Colombia aumentaron a 6,3 años al cierre de 2019, las de gas disminuyeron a 8 años: <https://www.minenergia.gov.co/web/guest/historico-de-noticias?idNoticia=24193984>
- Ministerio de Minas y Energía. (10 de Enero de 2020). *Histórico de precios*. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/historico-de-precios>
- Ministerio de Minas y Energía. (10 de Enero de 2020). *Precio Promedio GNCV en las EDS*. Obtenido de Gas Natural Comprimido Vehicular: <https://www.minenergia.gov.co/gas-natural-comprimido-vehicular1>
- Ministerio de Transporte. (2017). *Transporte en cifras estadísticas 2016*. Bogotá.
- Ministerio de Transporte. (2019). *Transporte en cifras Estadísticas 2018*.
- MinMinas. (2 de Febrero de 2020). www.minenergia.gov.co. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/precios-ano-2020>
- Mintzberg, H. (1994). *The Rise and Fall of Strategic Planning*. Prentice Hall.
- Mohr, S., & Evans, G. (2011). Long term forecasting of natural gas production. *Energy Policy*, 5550-5560.
- Monterrosa, H. (12 de Septiembre de 2018). Preocupación por incertidumbre en abastecimiento de gas natural. *La República*.
- Mouthón, L. (6 de Abril de 2017). Precio del gas debe tener un techo: Antonio Celia. *El Heraldo*.
- Nanaki, E., Koroneos, C., Xydis, G., & Rovas, D. (2014). Comparative environmental assessment of Athens urban buses—Diesel, CNG and biofuel powered. *Transport Policy*, 311-318.

- Nikolaou, I., & Evangelinos, K. (2010). A SWOT analysis of environmental management practices in Greek Mining and Mineral Industry. *Resources Policy*, 226-234.
- Oficina Asesora de Comunicaciones. (27 de Febrero de 2020). *Área Metropolitana del Valle de Aburrá*. Obtenido de <https://www.metropol.gov.co/Paginas/Noticias/se-declara-estado-de-alerta-por-calidad-del-aire-en-el-valle-de-aburra.aspx>
- Ogunlowo, O. O., Bristow, A. L., & Sohail, M. (2015). Developing compressed natural gas as an automotive fuel in Nigeria: Lessons from international markets. *Energy Policy*, 7-17.
- Ogunlowo, O., Bristow, A., & Sohail, M. (2017). A stakeholder analysis of the automotive industry's use of compressed natural gas in Nigeria. *Transport Policy*, 58-69.
- Organismos de Certificación Acreditados. (2019). *CertiGNV*. Obtenido de <http://www.certignv.com/>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). Convención Marco sobre el Cambio Climático. *Acuerdo de París - COP 21*, (pág. 40). París.
- Organización Mundial de la Salud - OMS. (2005). Guías de calidad del aire. *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*.
- Osorio-Tejada, J. L., Llera-Sastresa, E., & Scarpellini, S. (2017). Liquefied natural gas: Could it be a reliable option for road freight transport in the EU? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 785-795.
- Pastorello, C., Dilara, P., & Martini, G. (2011). Effect of a change towards compressed natural gas vehicles on the emissions of the Milan waste collection fleet. *Transportation Research Part D*, 121-128.
- Pellegrini, L. A., Guido, G. D., & Valentina, V. (2019). Energy and exergy analysis of acid gas removal processes in the LNG production chain. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 303-319.
- Portafolio. (27 de Marzo de 2015). Gas vehicular en Valle recibirá incentivos. *Portafolio*.
- Portafolio. (18 de Abril de 2017). Gorgon y Siluro serían los nuevos hallazgos de gas natural en aguas de la Costa Caribe. *Portafolio*.
- Porter, M. (1996). What Is a Strategy? *Harvard Business Review*, 59-79.
- PROMIGAS. (2017). *Informe del sector gas natural*.
- Promigas. (10 de 10 de 2018). PRUEBAS CON TRACTOCAMIONES A GAS NATURAL YA MUESTRAN RESULTADOS FAVORABLES PARA EL TRANSPORTE DE CARGA. *Magasín*, 15. Obtenido de https://www.surtigas.com.co/noticia_170_el-gnv-la-puesta-del-transporte-de-carga-en-colombia-170
- Promigas. (2018). *Transporte de gas natural*. Obtenido de <http://www.promigas.com>
- Promigas. (2018). *Transporte de Gas Natural*. Obtenido de <http://www.promigas.com>
- Promigas. (2019). Promigas promueve a nivel nacional la implementación del GNV. *Magasín*, 31-32.
- Puentes, A. (17 de Marzo de 2019). Regresa pico y placa ambiental extendido por baja calidad del aire. *El Colombiano*.
- Quiros, D., Smith, J., Thiruvengadam, A., Huai, T., & Hu, S. (2017). Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport. *Atmospheric Environment*, 36-45.
- Rauch, P., Wolfsmayr, U. J., Borz, S. A., & Triplat, M. (2015). SWOT analysis and strategy development for forest fuel supply chains in South East Europe. *Forest Policy and Economics*, 87-94.

- Reinemer, J. M. (1 de Abril de 2018). Evaluación de Factores Socioeconómicos y Técnicos que Afectan la Aplicación del Vehículo Eléctrico en Colombia. Chía, Cundinamarca, Colombia.
- Renault. (Abril de 2020). *Transformaciones Renault*. Obtenido de <https://www.renault.com.co/servicios/renault-servicios/renault-transformaciones.html>
- Revista Dinero. (2017). Gobierno expedirá nuevas normas para mejorar el transporte de gas. *Dinero*.
- Revista Semana & Asociación Nacional de Gas Natural - Naturgas. (29 de Noviembre de 2017). Foro "Gas Natural, una alternativa limpia para la movilidad". *Conclusiones: Foro "Gas Natural, una alternativa limpia para la movilidad"*. Bogotá, D.C., Colombia.
- Rosenstie, D. P., Heuermann, D., & Hüsigg, S. (2015). Why has the introduction of natural gas vehicles failed in Germany?—Lessons on the role of market failure in markets for alternative fuel vehicles. *Energy Policy*, 91-101.
- RTVC. (27 de Junio de 2020). *Radio Nacional de Colombia*. Obtenido de <https://www.radionacional.co/noticia/actualidad/buses-transmilenio-motor-gas-bogota>
- Rubens, G. Z., Noel, L., Kester, J., & Sovacool, B. K. (2020). The market case for electric mobility: Investigating electric vehicle business models for mass adoption. *Energy*.
- Saldarriaga-C, C. A., & Salazar, H. (2016). Security of the Colombian energy supply: The need for liquefied natural gas regasification terminals for power and natural gas sectors. *Energy*, 349-362.
- Shariatmadari, M., Sarfaraz, A. H., Hedayat, P., & Vadoudi, K. (2013). Using SWOT analysis and SEM to prioritize strategies in Foreign exchange market in Iran. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 886-892.
- Solangia, Y. A., Tan, Q., Mirjat, N. H., & Ali, S. (2019). Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: An integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS approach. *Journal of Cleaner Production*.
- Taha, H. A. (2012). *Investigación de Operaciones*. Juárez: Pearson.
- TGI; Ecopetrol; Fenosa. (6 de Abril de 2017). TGI, Ecopetrol y Gas Natural Fenosa impulsan gas natural vehicular en transporte masivo de Bogotá. Cartagena, Colombia.
- Transmilenio S.A. (2020). *Transmilenio*. Bogotá D.C.
- Transmilenio S.A. (01 de 07 de 2019). *Empiezan a rodar los primeros 140 buses de TransMilenio a gas natural en Bogotá*. Obtenido de <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/151332/empiezan-a-rodar-los-primeros-140-buses-de-transmilenio-a-gas-natural-en-bogota/>
- Transportadora de Gas del Interior. (2018). *Industria del Gas Natural*. Obtenido de <https://www.tgi.com.co/index.php/tgi/industria-del-gas-natural/datos-de-la-industria.com.co>
- Transportadora de Gas del Interior. (2018). *Infraestructura*. Obtenido de <https://www.tgi.com.co>
- Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2007). *La Cadena del Gas Natural en Colombia*. Bogotá.
- Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2015). *Balance de Gas Natural en Colombia 2015 - 2023*.
- Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2016). *Plan transitorio de abastecimiento de gas natural*. Bogotá.
- Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2018). *DOCUMENTO ANÁLISIS DE ABASTECIMIENTO Y CONFIABILIDAD DEL SECTOR*.

- Universidad de los Andes. (2016). *Conveniencia del Gas Natural Vehicular en Colombia*.
- UPME. (2016). *Boletín estadístico de Minas y Energía*. Bogotá: Nuevas Ediciones S.A.
- UPME. (2018). *Boletín Estadístico de Minas y Energía 2018*. Bogotá.
- UPME. (2018). *Energía Eléctrica SIN (Sistema Interconectado Nacional)*. Obtenido de Gas Natural: <http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/PETROLEO.aspx>
- UPME. (7 de Junio de 2020). www.upme.gov.co. Obtenido de http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html
- Valderrama, M. E., Cadena Monroy, Á. I., & Behrentz, E. (2019). Challenges in greenhouse gas mitigation in developing countries: A case. *Energy Policy*, 111-122.
- Vanti Gas Natural. (2018). *Simulador de ahorro GNV*. Obtenido de www.grupovanti.com
- Villamar, C. (Abril de 2003). Termodinámica. *Motores de Combustión Interna*.
- Voskoglou, M. G. (2016). Comparison of the COG Defuzzification Technique and Its Variations to the GPA Index. 1-12.
- Wang, Y., Xing, Z., Xu, H., & Du, K. (2016). Emission factors of air pollutants from CNG-gasoline bi-fuel vehicles: Part I. Black carbon. *Science of The Total Environment*, 1161-1165.
- Xingang, Z., Jiaoli, K., & Bei, L. (2013). Focus on the development of shale gas in China—Based on SWOT analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 603-613.
- Yarime, M. (2009). Public coordination for escaping from technological lock-in: its possibilities and limits in replacing diesel vehicles with compressed natural gas vehicles in Tokyo. *Journal of Cleaner Production*, 1281-1288.

ANEXOS

A. TENDENCIAS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLES Y CRECIMIENTO DE PARQUE AUTOMOTOR

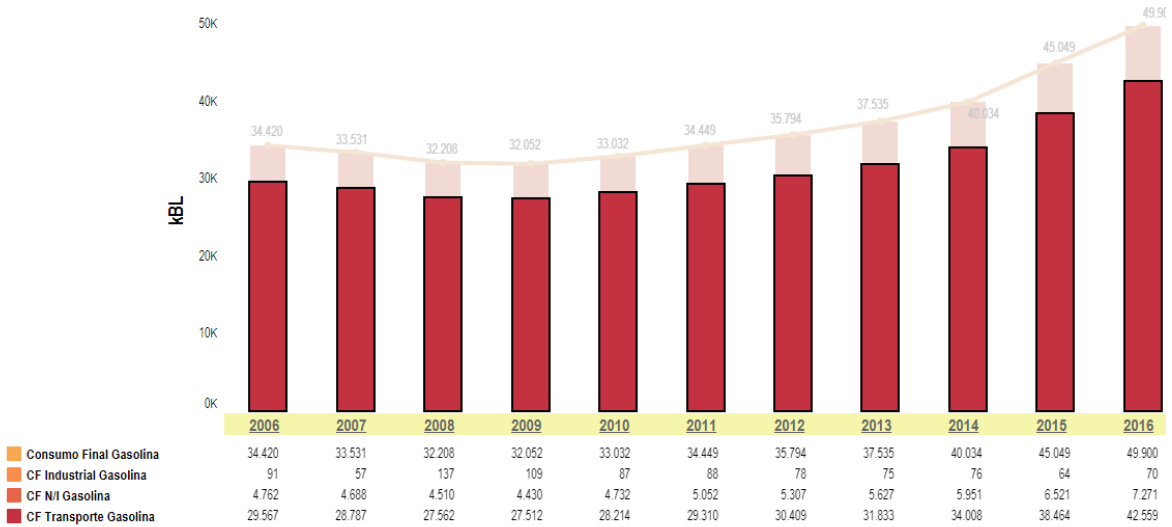


Figura 16. Tendencia de consumo final de gasolina – sector transporte. (UPME, 2018).

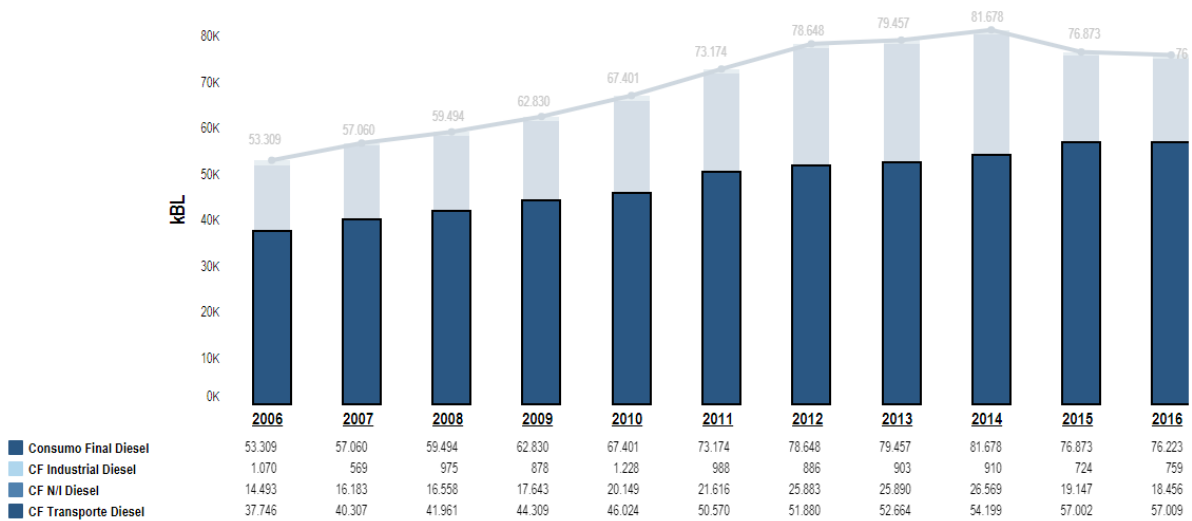


Figura 17. Tendencia de consumo final de diésel – sector transporte. (UPME, 2018).

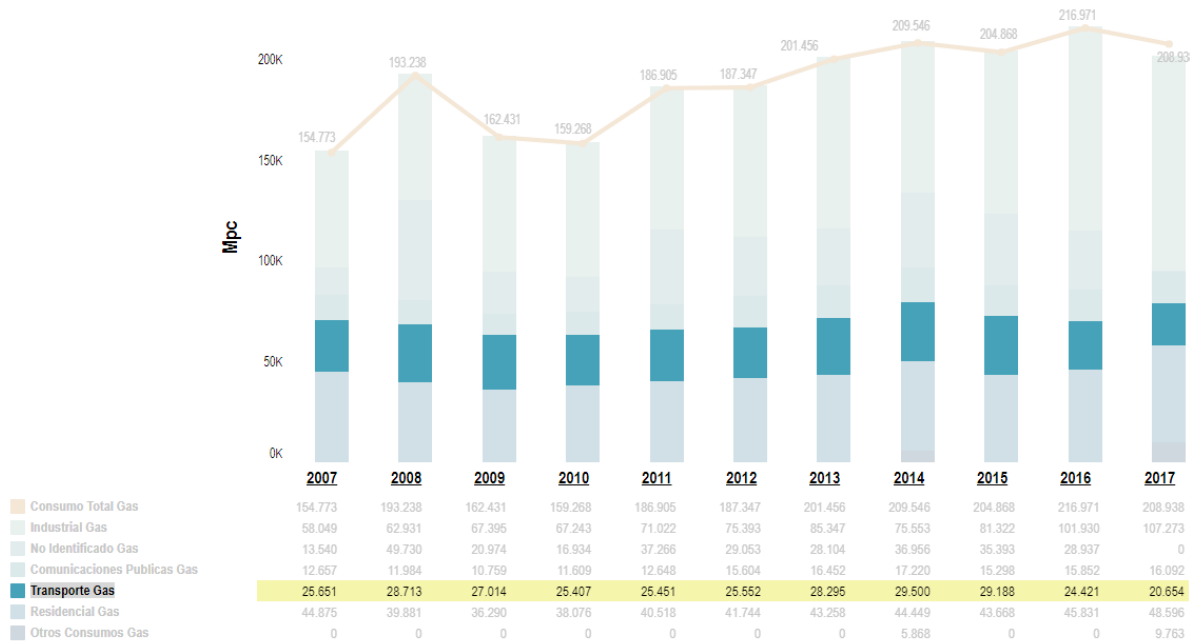


Figura 18. Tendencia de consumo final de gas natural – sector transporte. (UPME, 2018).

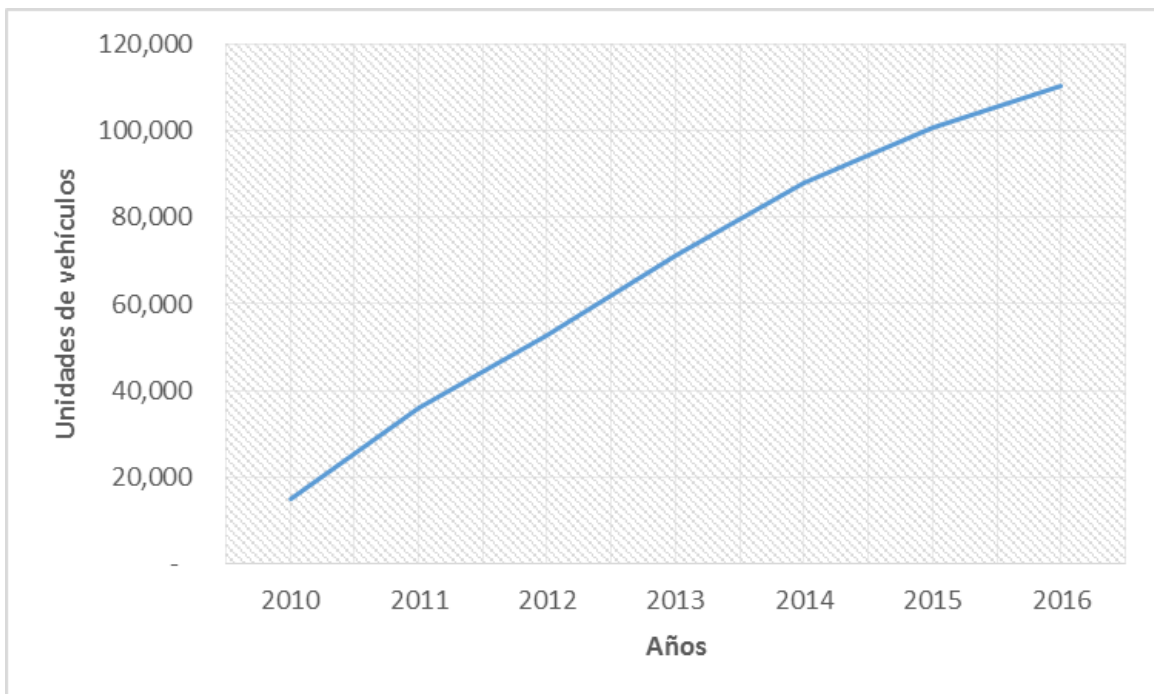


Figura 19. Crecimiento parque automotor – automóviles de servicio público. (Elaboración propia basada en datos del Ministerio de Transporte).

B. ENCUESTA STAKEHOLDERS – EVALUACIÓN GNCV

Entidad:
Nombre:
Cargo:
Perfil:

Se requiere evaluar el desempeño de cada una de las estrategias sugeridas a continuación en función de criterios relativos a fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas, para el consumo de GNCV en Colombia.

Por favor califique cómo considera que sería la relevancia de cada **criterio** para implementar las **estrategias** planteadas, de acuerdo a la siguiente tabla:

DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN	
Si la relevancia del <i>criterio</i> es muy alta para implementar la <i>estrategia</i>	MLT	MUY ALTA
Si la relevancia del <i>criterio</i> es significativamente alta para implementar la <i>estrategia</i>	SA	SIGNIFICATIVAMENTE ALTA
Si la relevancia del <i>criterio</i> es alta para implementar la <i>estrategia</i>	ALT	ALTA
Si la relevancia del <i>criterio</i> es media para implementar la <i>estrategia</i>	MED	MEDIA
Si la relevancia del <i>criterio</i> es baja para implementar la <i>estrategia</i>	BAJ	BAJA
Si la relevancia del <i>criterio</i> es significativamente baja para implementar la <i>estrategia</i>	SB	SIGNIFICATIVAMENTE BAJA
Si la relevancia del <i>criterio</i> es muy baja para implementar la <i>estrategia</i>	MBJ	MUY BAJA
Si el <i>criterio</i> es irrelevante respecto a la <i>estrategia</i> o no hay ninguna relación	NA	NO TIENE RELACIÓN

Los registros de esta evaluación se deben registrar en la siguiente matriz:

Ejemplo:

Considera que la relevancia del **criterio C7** es **muy alta (MLT)** para implementar la **estrategia A7**.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
A1																				
A2																				
A3																				
A4																				
A5																				
A6																				
A7							MLT													
A8																				
A9																				
A10																				
A11																				
	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10

Las estrategias planteadas son las siguientes:

A1: FO1: Explotar nuevos yacimientos y aprovechar la infraestructura que tiene el país para la operación y suministro de GNCV.

A2: FO2: Implementar regulación sobre niveles de emisiones contaminantes.

A3: FO3: Crear estímulos comerciales para el uso de GNCV en vehículos particulares y de servicio público.

A4: FA1: Construir nuevas plantas regasificadoras.

A5: FA2: Generar de empleos calificados para los procesos de conversión y certificación a GNCV.

A6: FA3: Implementar un régimen regulado para el precio de producción del gas natural.

A7: DO1: Aumentar el potencial de reservas de gas natural.

A8: DO2: Hacer ajustes a los procesos de certificación de vehículos.

A9: DO3: Adoptar un sistema de subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos.

A10: DA1: Aumentar la importación del gas natural licuado.

A11: DA2: Ampliar la capacidad operativa para la vigilancia y el control.

Los criterios establecidos son los siguientes:

1: Infraestructura para operación y suministro.

2: Precio del GNCV.

3: Emisión de gases efecto invernadero.

4: Mantenimiento de vehículos convertidos.

5: Generación de empleos calificados.

6: Compromiso del país con la COP 21.

7: El aprovechamiento y explotación de nuevos yacimientos.

8: Construcción de nuevas plantas regasificadoras.

- 9: Tamaño del parque automotor.
- 10: Programas de subsidios y financiamientos especiales para la conversión de vehículos.
- 11: Reservas de gas natural.
- 12: Fabricación nacional de componentes para la conversión de vehículos.
- 13: Comportamiento del precio de los combustibles líquidos (diésel y gasolina).
- 14: Política pública que estimule el consumo de GNCV.
- 15: Potencia de los vehículos convertidos.
- 16: Procesos de certificación de vehículos y de las revisiones periódicas.
- 17: Regulación del precio de producción del gas natural.
- 18: Actividades de exploración.
- 19: Cumplimiento de la normatividad.
- 20: Capacidad operativa para la vigilancia y el control.

Por favor haga saber su opinión sobre las siguientes preguntas:

- ¿Cuánta inversión cree que se necesitaría para implementar esa estrategia?
- ¿Cuánto tiempo estima que se tomará la implementación de esa estrategia? ¿Por qué?
- ¿Cree que esa estrategia si revertirá la tendencia decreciente de consumo de GNCV? ¿Por qué?
- ¿Qué otras acciones considera que hacen falta para estimular el consumo de GNCV en Colombia?

C. PERFILES DE EXPERTOS CONSULTADOS

- Ingeniero de Proyectos de taller de conversión. Ingeniero Mecánico con más de 20 años de experiencia en el sector de GNCV, conversión de vehículos e importación de equipos para instalación.
- Técnico GNV de distribuidora de gas natural. Ingeniero Mecánico, Magister en diagnóstico automotriz. Con más de 14 años de experiencia en el sector de GNCV, conversión de vehículos y suministro de GNCV y 4 años de experiencia en el sector automotriz. Ha ejecutado proyectos de implementación, en la parte técnica, de incentivos comerciales para los usuarios. Es miembro del comité que normaliza la parte de GNCV en Colombia.
- Profesional Especializado de la Dirección de Regulación del Ministerio público. Ingeniero Electrónico con de 10 años de experiencia en el sector de GNCV. Especialista en Gerencia Empresarial y Financiera.
- Desarrollador de Negocios de Gas de Compañía petrolera. Administradora de Empresas con 14 años de experiencia en el sector de GNCV, negocios y distribución. Especialista en Mercadeo Estratégico.
- Líder de URBES de la transportadora de gas nacional. Administradora de Empresas con 18 años de experiencia en el sector de Gas Natural, especializada en Recursos Energéticos y Mercadeo. Participó en el proyecto de la gestión de la licitación de la flota 1 y 2 de Transmilenio.
- Director comercial de conversiones de compañía petrolera. Economista con 27 años de experiencia en el sector de GNCV. Participó en la creación del modelo de negocios para vehículos 0 kilómetros a GNCV.
- Gerente de taller de conversión. Economista con 18 años de experiencia en el sector de conversiones a GNCV. Ha promovido proyectos de seguros de respaldo para vehículos a GNCV y de homologación de aceites para motores convertidos.
- Vicepresidente Técnico de asociación de centros de diagnóstico automotor. Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional. Con experiencia en GNCV como Secretario Técnico de la Comisión Técnica del GNCV. Participó de una Comisión de ACOGAS (Asociación Colombiana de Gas. Fue Director Técnico de revista sobre gas vehicular y Jefe de Inspección a cargo de la inspección de EDS de GNCV y Talleres de Conversión de Vehículos a GNCV.
- Analista de estudios de empresa de estudios y análisis del sector energético. Analista de estudios energéticos con más de 5 años de experiencia en la rama de gas natural.
- Profesional de normalización de organismo normalizador. Ingeniero Mecánico con más de 20 años de experiencia en el sector de GNCV. Ha trabajado desde los ámbitos de la normalización y con el gremio, en la Asociación Colombiana de Gas – NATURGAS. Actualmente es Coordinador del Comité que normaliza la parte de GNCV en Colombia. Ha participado en iniciativas de elaboración y actualización de diferentes normas técnicas relacionadas.
- Profesional de la Dirección de Hidrocarburos del Ministerio Público. Ingeniero Industrial de la Universidad de América, especializado en evaluación de proyectos y con Maestría en Administración de Empresas; tiene más de 4 años de experiencia en el área de gas natural. Ha participado en proyectos como la implementación del Sistema de Información de

Combustibles para GNCV (SICOM GNCV) y en la reglamentación técnica del sector gas combustible (GNCV-GLP-GNL).

- Secretario General de la Asociación Colombiana de Gas Natural – NATURGAS. Economista de la Universidad de los Andes, con estudios de Maestría en Economía y en Energía y Minería, con más de 8 años de experiencia en el sector de gas natural.
- Profesional Especializado que se desempeñó en la Subdirección de Demanda de la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. Ingeniera Química de la Universidad de los Andes, cuenta con Maestría en Ingeniería con énfasis en gestión ambiental y Maestría en gestión sostenible de la energía. Con más de 6 años de experiencia en GNCV. Lideró el proyecto de pruebas piloto para energías alternativas y desarrollo del mapa de ruta para tecnologías de cero y baja emisión de transportes.
- Superintendente Delegado para el Control y Verificación de Reglamentos Técnicos del ministerio público. Abogado de la Universidad Externado de Colombia, especialista en derecho económico y de los mercados y en derecho comercial de la Universidad del Rosario. También ha sido asesor en regulación técnica y metrología legal. Es también el representante de Colombia ante la Organización Internacional de la Metrología Legal – OIML y hace parte de la Comisión Intersectorial de la Calidad y de la Comisión Intersectorial de Regulación Técnica.

D. CÓDIGO GUROBI

```
'''Problema de programacion por objetivos para priorizacion de alternativas'''

# Importar librerias
from gurobipy import *
from importador import *
import pandas as pd

# Definicion de conjuntos. Se leen desde un archivo externo
# 1. Criterios de evaluacion
criterios = importar_conjunto('Conjuntos.xlsx','Criterios')
# 2. Alternativas a ser evaluadas
alternativas = importar_conjunto('Conjuntos.xlsx','Alternativas')

# Parametros. Se leen desde un archivo externo
# 1. Ponderacion de los criterios
omega = importar_vector('Parametros.xlsx','Datos_criterios','criterio',1)
# 2. Objetivo
G = importar_vector('Parametros.xlsx','Datos_criterios','criterio',2)
# 3. Matriz de evaluacion de cada criterio para cada alternativa
A = importar_tabla_2D('Parametros.xlsx','Matriz_A','alternativa')
# 4. Vector binario que determina si una alternativa no se evalua en el programa (1) o (0) si se evalua
incluir = importar_vector('Parametros.xlsx','Incluir','alternativa',1)

# Declaracion del modelo
m = Model('GP_COL')

# Variables de decision
# 1. Variable binaria que toma valor de 1 si la alternativa se selecciona
X = m.addVars(alternativas, vtype=GRB.BINARY, name = 'X')
# 2. Desviacion por defecto del objetivo del criterio
dmenos = m.addVars(criterios, vtype=GRB.CONTINUOUS, name='dmenos')
# 3. Desviacion por exceso del objetivo del criterio
dmas = m.addVars(criterios, vtype=GRB.CONTINUOUS, name='dmas')

# Restricciones
# 1. Cumplimiento de los objetivos para cada criterio
m.addConstrs((quicksum(A[alternativa,criterio]*X[alternativa]
alternativas)+dmenos[criterio]-dmas[criterio] == G[criterio]
for criterio in criterios), name='Cumplimiento')
# 2. Restriccion que garantiza que solo se escoja una alternativa
m.addConstr((quicksum(X[alternativa] for alternativa in alternativas) == 1), name='Una_alternativa')
# 3. Determina cuales alternativas se quieren incluir en el analisis. NO APARECE EN LA FORMULACION
m.addConstr((quicksum(X[alternativa]*incluir[alternativa] for alternativa in alternativas) == 0),
name='Incluir')

# Funcion objetivo
obj = quicksum(omega[criterio]*(dmas[criterio]+dmenos[criterio]) for criterio in criterios)
m.setObjective(obj, GRB.MINIMIZE)
m.optimize()

#Análisis de sensibilidad
#Variables de decision
cols1 = ["Variable", "Valor"]
data1 = []
for v in m.getVars():
    data1.append([v.Varname,v.X])

sal1 = pd.DataFrame(data1, columns=cols1)

m.write("Resultado.sol")
#Exportar a Excel
writer = pd.ExcelWriter('Sensibilidad.xlsx')
sal1.to_excel(writer, sheet_name="Variables")
writer.save()
```