

**PLANEAMIENTO HOLÍSTICO DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE
GNL CONSIDERANDO SU IMPACTO EN LOS SECTORES DE
ELECTRICIDAD Y TRANSPORTE DE CARGA PESADA: UN ENFOQUE
MULTIOBJETIVO**

PRESENTADO POR:
JULIAN EDUARDO IBARRA VADILLO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Eléctrica

DIRIGIDO POR:
CARLOS ARTURO SALDARRIAGA CORTÉS, Ph.D

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS, ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, FÍSICA Y
CIENCIAS DE LA COMPUTACION
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
PEREIRA, NOVIEMBRE DE 2019



**PLANEAMIENTO HOLÍSTICO DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE
GNL CONSIDERANDO SU IMPACTO EN LOS SECTORES DE
ELECTRICIDAD Y TRANSPORTE DE CARGA PESADA: UN ENFOQUE
MULTIOBJETIVO**

**PRESENTADO POR:
JULIAN EDUARDO IBARRA VADILLO**

**DIRIGIDO POR:
CARLOS ARTURO SALDARRIAGA CORTÉS, Ph.D**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS, ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, FÍSICA Y
CIENCIAS DE LA COMPUTACION
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
PEREIRA, NOVIEMBRE DE 2019**

Dedicatoria

Me crié entre mujeres maravillosas de todas he aprendido mucho, pero hay una especial que ya no está conmigo, a la cual siempre quise darle un reconocimiento, rendirle un merecido homenaje y agradecerle todo lo que de ella hay en mí, ese día ha llegado.

¡Va para vos mamita Gilma!

Agradecimientos

A mis padres, hermanita y familia en general, ustedes son los artífices de cada uno de mis logros, gracias por el apoyo y enseñarme el camino de la dedicación y de la constante superación personal de una forma honrada y sincera, ustedes son mi orgullo y mi mayor motivación para seguir. Los amo.

A mi tutor, Carlos Saldarriaga, por su guía y acompañamiento durante este último año y medio, he aprendido demasiado de él como profesional y como persona, espero seguir haciéndolo. Gracias, amigo.

Al ingeniero Harold Salazar, por su tiempo, guía y acompañamiento, muchas gracias por la confianza que ha depositado en mí y por ser ese ejemplo de lo que es ser un profesional.

A mis compañeros de la universidad y del grupo de trabajo. A Diego, Sama, Manuel, Anita, Santiago, Daniel, Luis Carlos, Adrián, Luis Miguel, a todos los muchachos del 15C-107, a los del 1B-147, a los compañeros del grupo ESEP, muchas gracias por las experiencias vividas y por toda la ayuda que he recibido de cada uno de ustedes.

A todos los profesores del programa de ingeniería eléctrica y de la maestría en ingeniería eléctrica de la UTP, gracias por todo el conocimiento y la experiencia que he recibido de ustedes.

Resumen

En el presente trabajo de grado se plantea una metodología para abordar la problemática del planeamiento holístico de la cadena de suministro de gas natural licuado (GNL) considerando su impacto en los sectores de electricidad y transporte de carga pesada. Para ello se propone el desarrollo de una metodología de planeamiento integrado multi-etapa y multi-objetivo, que permita de manera holística determinar los mejores requerimientos de infraestructura asociada a la producción, importación, transporte y uso del GNL para múltiples periodos de inversión, considerando su impacto sobre sectores estratégicos como el de transporte de vehículos de carga pesada, el termoeléctrico y todos aquellos que se abastecen de energía haciendo uso de la red nacional de transporte de gas natural por tubería.

De acuerdo con lo anterior, para la formulación del problema se emplea un modelo matemático de tipo lineal entero mixto, donde se combina la función objetivo que busca la minimización de los costos de inversión de infraestructura y la minimización de los costos de operación, con un conjunto de restricciones que consideran las características operativas de la cadena de producción y suministro de gas natural por tubería (GNT) y GNL, todo esto bajo un enfoque multi-objetivo basados en criterios técnico y económicos.

Para resolver el problema de planeamiento planteado, se emplea como técnica de solución el algoritmo genético de optimización multi-objetivo NSGA II. Ya que según la literatura consultada esta herramienta ha demostrado un desempeño exitoso en gran cantidad de problemas combinatoriales de alta complejidad y particularmente en problemas con características binarias, como es el caso de las decisiones de inversión en infraestructura. La metodología le ofrece al planificador un conjunto de soluciones de alta calidad, que le permite tomar decisiones en función de sus preferencias con respecto a los objetivos planteados.

Con el fin de demostrar el buen desempeño de la metodología propuesta, esta se emplea en un sistema de prueba basado en el caso colombiano, donde los resultados obtenidos corroboran la efectividad y contundencia de la metodología propuesta.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1	9
1. Introducción	9
1.1. Definición y justificación del problema	9
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo general	13
1.2.2. Objetivos específicos	13
1.3. Estado del arte	13
1.4. Aportes del trabajo de grado	17
1.5. Estructura del documento	17
Capítulo 2	19
2. Descripción general del problema y formulación matemática empleada	19
2.1. Descripción general del problema.....	19
2.2. Descripción de la formulación matemática	20
Capítulo 3	25
3. Metodología y técnica de solución	25
3.1. Optimización Multi-objetivo	25
3.2. Algoritmo Genético Elitista de Ordenamiento No Dominado (NSGA II) ..	26
3.3. Metodología propuesta.....	27
Capítulo 4	32
4. Resultados numéricos	32
4.1. Sistema de prueba: Caso colombiano.....	32
4.1.1. Sector transporte de carga pesada.....	33
4.1.2. Sector termoeléctrico	35
4.1.3. Red de transporte de GNT	37
4.1.4. Cadena de suministro de GNL.....	38
4.2. Implementación de la metodología propuesta y resultados	42
Capítulo 5	53
5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros	53
5.1. Conclusiones	53
5.2. Recomendaciones y trabajos futuros	55
6. Bibliografía	56

7. **Anexo**59

Principales siglas, abreviaturas y nomenclatura

A continuación, se presentan las abreviaturas utilizadas en este documento:

ACRÓNIMO	SIGNIFICADO
AG	Algoritmo Genético
CAISO	California Independent System Operator
DGE	Diesel Gallon Equivalent
ER	Estación de Recarga
ES	Estación Satélite
FERNC	Fuentes de Energía Renovables No Convencionales
F.O.	Función Objetivo
GAMS	General Algebraic Modeling System
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GGE	Gasoline Gallon Equivalent
GN	Gas Natural
GNC	Gas Natural Comprimido
GNL	Gas Natural Licuado
GNT	Gas Natural por Tubería
MCL	Metros Cúbicos Líquidos
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MP	Material Particulado
NSGAI	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II
MUSD	Millions US Dollars
UTP	Universidad Tecnológica de Pereira

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Definición y justificación del problema

En la actualidad el gas natural (GN) es reconocido como el hidrocarburo más limpio en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y material particulado (MP) [1]. De igual forma, el GN es un combustible que presenta bajos costos y reservas probadas en el mediano plazo [2], y es reconocido como una fuente de energía segura en términos de transporte, almacenamiento y uso [3]. Estas características lo convierten en una alternativa atractiva para la sustitución de combustibles costosos y contaminantes (i.e. derivados del petróleo como la gasolina y el diésel, ver Tabla I en sectores estratégicos, como los son, el sector termoeléctrico y el sector de transporte de carga pesada. Estos sectores son cruciales para el desarrollo económico de un país y por ende es fundamental garantizarles el acceso a fuentes de energía de bajo costo y de suministro seguro, pero a la vez, son sectores con alta participación en la producción de emisiones de GEI y MP, los cuales tienen un alto y nocivo impacto en el ecosistema y en la salud de la población [4].

Tabla I. Precios promedio internacionales de combustibles al por menor sobre una base equivalente en energía, Enero 2018 [5]

	Por equivalente a un galón de gasolina [\$/GGE]	Por equivalente a un galón de diésel [\$/DGE]	Por equivalente a un MBTU [\$/MBTU]
Gasolina	\$2.50	\$2.82	\$21.87
Diesel	\$2.63	\$2.96	\$23.00
GNC	\$2.17	\$2.45	\$18.99
GNL	\$2.36	\$2.66	\$20.67

Fuente: U.S. Department of energy. (Enero 2018) clean cities alternative fuel price report.

Es por lo anterior que el GN en sus diferentes presentaciones, es decir, gas natural licuado (GNL), gas natural comprimido (GNC) o gas natural por tubería (GNT), debe ser considerado como una alternativa de sustitución que permita realizar una transición hacia una matriz energética, de bajo costo, con seguridad en el suministro y baja en carbono [6]. Vale la pena resaltar, que en el sector termoeléctrico el GN no solo juega el papel de sustituto de combustibles costosos y contaminantes, sino que también es una opción contundente para maximizar la penetración de fuentes de energía renovables no convencionales (FERNC), pues la generación a base de GN permite contar con el respaldo necesario para lidiar con la intermitencia intrínseca a las FERNC, un ejemplo de esto se presenta en [7], donde el operador independiente del mercado de California (CAISO por sus siglas en inglés) reporta que gracias a la generación a base de GN pudo incorporar altos porcentajes de generación eólica y solar. Igualmente, en el sector transporte el GN está protagonizando una revolución a nivel internacional. Pues sus bajos costos y atractivas ventajas en términos ambientales [8], [9], ha promovido que los gobiernos de países como España [10], Turquía [11] y China [12] entre otros, incentiven la penetración masiva de vehículos que operan a base de GNC y GNL, tanto para uso doméstico como para el transporte masivo de pasajeros y mercancías.

Sin embargo, la apropiada incorporación del GN en sus diferentes formas, requiere de herramientas de optimización que permitan maximizar el aprovechamiento de sus ventajas y reducir los efectos de sus desventajas. Para esto, es necesario caracterizar cada uno de los sectores en los cuales el GN puede ser una alternativa eficaz, lo cual implica el desarrollo de modelos matemáticos que consideren las restricciones técnico-económicas de cada sector. Y posteriormente, mediante el uso de dichos modelos, establecer las necesidades de infraestructura requeridas por cada sector.

Es por lo anterior, que en este documento se propone el desarrollo de una metodología de optimización multi-objetivo, que permita realizar el planeamiento integrado de la cadena de suministro de GNL como solución logística para el transporte de GN, y considerando los requerimientos actuales y futuros de sectores

estratégicos como el sector de transporte de carga pesada y el sector termoeléctrico. Dicha metodología deberá determinar qué tipo de infraestructura debe ser construida, así como dónde y cuándo, esto con la intención de garantizar el suministro seguro y a bajo costo de la energía requerida por los sectores bajo análisis.

De manera concreta, la metodología de planeamiento debe poder determinar la infraestructura necesaria para el abastecimiento y transporte del GN en sus diferentes formas. En el caso de GNT, se deben establecer los requisitos de infraestructura de transporte por tubería, de producción nacional (pozos) y de importación, necesarios para atender los requisitos de todos los consumidores de este tipo de gas. En este sentido, y dado que el GNC es usualmente tomado directamente de la red de GN, este se considera un usuario más de dicha red, por lo tanto, sus necesidades de infraestructura se consideran incluidas dentro de las necesidades de GNT.

Mientras que, en el caso del GNL, se requiere de la implementación de una cadena logística que permita la producción, transporte y uso final de dicho combustible. Para esto es necesario que la metodología de planeamiento esté en capacidad de determinar de qué fuente se obtendrá el GN para producir GNL, esto podría implicar la construcción de estaciones de licuefacción que tomen el GN directamente de la red de tuberías o de los pozos nacionales y lo licuen, o la construcción de infraestructura de importación de GNL que permita obtener el producto del mercado internacional; igualmente, se requiere de la construcción de centros de acopio (estaciones satélite ES) que permitan almacenar y distribuir en GNL a los diferentes usuarios por medio de carros-cisterna [13]. Por último, se requiere de la construcción de infraestructura de uso final, la cual depende del tipo de sector que utilice en GNL, por ejemplo, en el caso del sector transporte se requieren estaciones de recarga (ER) que permitan almacenar en sitio en GNL y recargar vehículos que consuman este combustible, mientras que, en el caso del sector termoeléctrico se requieren instalaciones de almacenamiento y regasificación local que permitan la inyección del GN en estado gaseoso a las turbinas de gas [14].

De lo anterior se puede concluir, que tal y como se observa en la Figura 1, las decisiones en infraestructura asociada a las tres formas logísticas del GN (i.e. GNT, GNC, GNL) están completamente interrelacionadas, y dicha interrelación afecta a sus consumidores, entre ellos los sectores de transporte y termoeléctrico. De allí, la necesidad de una metodología multiobjetivo que permita realizar el planeamiento de múltiples sistemas de manera holística (GNT, GNL, sector transporte de carga pesada y el sector termoeléctrico), con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de los recursos y que permita analizar diferentes aspectos de la problemática, como lo son: los costos de inversión y de operación entre todos los sistemas bajo estudio, y los efectos en términos de reducción de GEI y de MP. Se plantea el planeamiento de manera holística ya que como su definición lo dice se están considerando múltiples sistemas y sus propiedades para un análisis global e integrado, en donde se analizan dichos sistemas como un todo. Esta metodología entregaría al tomador de decisiones un conjunto de planes de inversión, que le permite tener alternativas ante diferentes intereses en aspectos tanto técnicos como económicos.

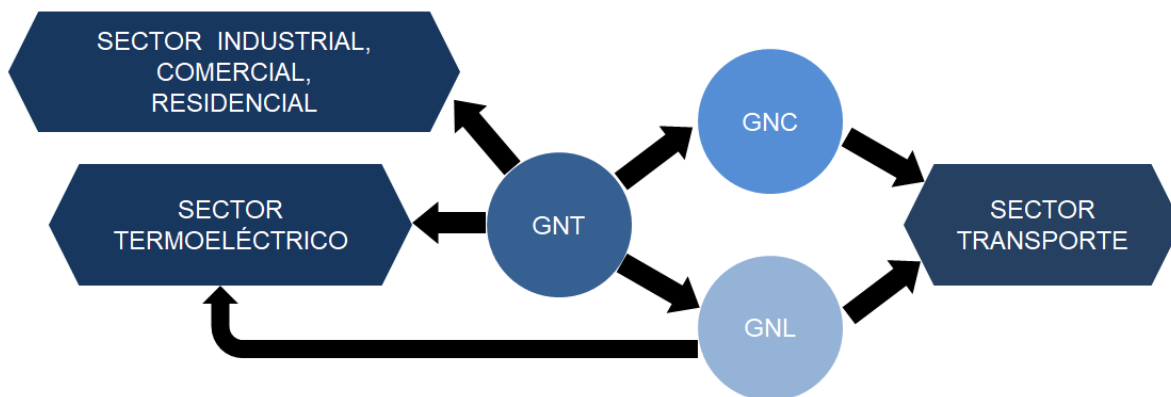


Figura 1. Interrelaciones entre los consumidores de las distintas formas logísticas del GN

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología de planeamiento integrado multi-etapa y multi-objetivo, que permita de manera holística determinar los requerimientos de infraestructura de la cadena de producción y suministro de GNL, para abastecer las necesidades de energía de los sectores de transporte de carga pesada y termoeléctrico para múltiples periodos de inversión, considerando criterios técnicos y económicos.

1.2.2. Objetivos específicos

- Actualización del estado del arte, considerando los últimos avances respecto a los modelos de integración de la cadena de suministro de GNT y GNL, y los sectores de transporte de carga pesada y termoeléctrico.
- Implementar modelos matemáticos que representen el comportamiento operativo integrado de los sectores de transporte de carga pesada y termoeléctrico, así como de la cadena de producción y suministro de GNT y GNL.
- Incluir los modelos matemáticos dentro de una metodología de planeamiento multi-objetivo basada en el algoritmo NSGA II.

1.3. Estado del arte

El GNL proviene del proceso de licuar el GN en donde se lleva este gas a un estado líquido por medio de la reducción de su temperatura a -162°C . Comúnmente se licua el GN en pozos locales como se expone en [15], donde se plantea la

posibilidad de transportar el GNL por medio de carros-cisterna a estaciones de almacenamiento de GNL, ya que es necesario almacenar criogénicamente este combustible para posteriormente ser suministrado a los usuarios finales. Por otra parte, el GNL se puede importar por medio de buques metaneros desde otros países, por lo tanto, se hace necesario realizar el planeamiento de la infraestructura para la compra del GNL en puerto. Varios estudios se han enfocado en este tema, por ejemplo, en [16] se plantea un modelo de optimización MILP (programación lineal entera mixta por su sigla en inglés) para la cadena de suministro de GNL a pequeña escala, a lo largo de una línea costera en Finlandia. Adicionalmente, otros estudios se enfocan en la operación del suministro de GNL en puerto, este es el caso de [17], donde se desarrolla un modelo matemático para ayudar a la toma de decisiones logísticas para la cadena de suministro de GNL únicamente para el transporte marítimo, considerando un conjunto de puertos de suministro y un conjunto de puertos de recepción.

El suministro de GNL es un tema ampliamente estudiado en la literatura, dado los beneficios económicos y ambientales que conlleva la implementación de este combustible en sectores de consumo de GN como lo son, el sector transporte de carga pesada y el sector termoeléctrico. Estos beneficios son enlistados en múltiples estudios comparativos con respecto al diésel. Se destacan [18] y [19], donde se expone que el GN debería convertirse en un combustible cada vez más atractivo para desplazar los productos derivados del petróleo en mercados como el estadounidense, dado su bajo costo y sus bajas emisiones de GEI y MP.

Si bien, el GNL puede provenir tanto de pozos locales como del mercado internacional, es necesario realizar la planificación apropiada de la entrega de este combustible a los usuarios finales. En este sentido, en [20] se estudia el problema de diseñar un plan de suministro óptimo de GNL en el largo plazo. Los autores afirman, que este plan juega un papel fundamental en las decisiones de logística asociadas a la disponibilidad de atraque de los buques en puerto, el inventario de los terminales de licuefacción, el almacenamiento de GNL y la infraestructura del sistema de tuberías para garantizar un flujo continuo de GN a las plantas de procesamiento donde se produce el GNL y se almacena en tanques criogénicos.

Por otro lado, existen estudios que se enfocan en el planeamiento de la infraestructura de almacenamiento y abastecimiento de GNL para el sector transporte. En este sentido, en [21] se propone pronosticar la penetración de camiones a GNL e implementar un modelo de optimización el cual minimiza los costos totales de inversión y operación de las estaciones de recarga necesarias para satisfacer la demanda de GNL de este sector.

Por otro lado, en la literatura especializada se reporta la creciente demanda de GN por parte del sector transporte en Estados Unidos, y cómo esto crea la necesidad de realizar la expansión de la infraestructura de la red de gas, en conjunto con el planeamiento óptimo de la cadena de suministro de GNC y GNL. En este sentido, en [22] se emplea un modelo de optimización basado en programación lineal entera mixta, que busca maximizar los beneficios, al resolver el planeamiento de la infraestructura de transporte de GN por gasoducto para abastecer la demanda de este combustible en California, la cual considera la construcción de estaciones de reabastecimiento de GNC y de GNL para el sector transporte.

Como se discutió anteriormente otros sectores que se encuentran estrechamente relacionados son, el sistema de GNT y el sistema eléctrico [7], [14], pues el sector termoeléctrico basa mayoritariamente su operación en la quema de GN. La integración física y operativa entre estos dos sectores a nivel mundial ha tenido un notorio aumento en los últimos 10 años, debido a las ventajas económicas y ambientales en comparación con los combustibles fósiles [8], [9]. Además, las unidades de ciclo combinado cuentan con grandes ventajas a la hora de generar energía eléctrica, esto debido a la alta eficiencia, respuesta rápida y menores tiempos de instalación. Por consiguiente, a nivel mundial se ha venido fomentando el aumento en materia de inversión en nuevas unidades térmicas que operan a GN por parte de los agentes de mercado y los gobiernos en la producción de electricidad [23].

Por otra parte, debido a técnicas de explotación como el fracking, el GN se ha convertido en una fuente de energía de bajo costo y ha demostrado tener reservas

disponibles a largo plazo [24], esperando un aumento mundial de hasta un 69% en el consumo anual desde ahora hasta 2040 [25], siendo las centrales térmicas los principales consumidores.

Por lo anterior, es que en estudios como el presentado en [26] se emplea una herramienta multi-objetivo de planeamiento integrado basado en un algoritmo genético (SPEA-II) como técnica de solución. Donde se analizan de forma conjunta diferentes sistemas como los sistemas de distribución de gas y electricidad, lo que permite obtener un conjunto de soluciones de alta calidad de acuerdo con las necesidades establecidas de cada sistema. También en [27] se hace un análisis más profundo, pues se considera la incertidumbre en el crecimiento de la demanda, en donde el modelo implementado puede determinar la infraestructura necesaria para que los sistemas bajo estudio que comprende el planeamiento integrado funcionen de manera adecuada y eficiente. Así mismo en [28] se plantea un modelo matemático multi-objetivo, que ofrece al tomador de decisiones o planificador un conjunto de soluciones de alta calidad en función de sus preferencias con respecto a los objetivos que se persigan.

Como se puede observar de los estudios encontrados en la literatura se evidencia la necesidad de analizar de manera integrada los sistemas involucrados en el suministro de GN como lo son, la cadena de suministro de GNL, la red de GNT, el sector transporte de carga pesada y el sector termoeléctrico, de esta forma se garantiza que para este planeamiento se consideren los efectos de cada inversión sobre todos los sectores involucrados.

En la literatura analizada no se encuentra información acerca de una investigación que proponga el planeamiento de forma integrada del sistema de transporte de GNT, la cadena de suministro de GNL, el sector transporte de carga pesada y el sector termoeléctrico por medio de una metodología que permita perseguir múltiples objetivos basados en criterios técnicos y económicos, lo cual corresponde al tema que se abordará en este trabajo de grado.

1.4. Aportes del trabajo de grado

Los principales resultados y aportes de este trabajo de grado son los siguientes:

- Se desarrolla una metodología de planeamiento holístico multi-etapa y multi-objetivo la cual determina la cadena de suministro de GNL necesaria para satisfacer las necesidades energéticas de una región o un país, considerando su impacto en los sectores de electricidad y transporte de carga pesada.
- El problema de planeamiento es modelado con una formulación de tipo lineal entera mixta, lo que permite garantizar optimalidad en la solución de los subproblemas, lo cual es ideal a la hora de realizar optimización multi-objetivo pues permite determinar el mejor comportamiento operativo de cada propuesta de inversión realizada por la metodología y así encontrar el frente Pareto-óptimo que representa las funciones objetivo consideradas.
- La metodología fue implementada en un sistema de prueba de gran tamaño basado en las características del sistema colombiano, esto prueba no solo que la metodología es robusta y eficiente, sino que tiene un importante impacto en la toma de decisiones en países con economías en desarrollo que se enfrentan al reto de modernizar su infraestructura de transporte y energía y que presentan limitaciones presupuestales, en cuyo caso es ideal tener un paquete de inversiones Pareto-óptimas.

1.5. Estructura del documento

Los capítulos restantes del documento se dividen de la siguiente forma:

En el capítulo dos se realiza una descripción general del problema de planeamiento abordado en esta investigación y se presenta de manera descriptiva

el modelo matemático que representa el comportamiento operativo integrado de los sistemas bajo estudio.

En el capítulo tres se presenta la técnica propuesta para el desarrollo de la investigación y se describe la metodología de planeamiento integrado multi-objetivo desarrollada para el planeamiento holístico de los sistemas bajo estudio.

El capítulo cuatro presenta el sistema de prueba y el escenario propuesto para el caso de estudio, además se presenta el análisis de los resultados obtenidos.

Por último, en el capítulo cinco se exponen las conclusiones de esta investigación, así como las recomendaciones y trabajos futuros.

Capítulo 2

2. Descripción general del problema y formulación matemática empleada

En este capítulo se describe de manera general el problema abordado en la investigación y la formulación matemática empleada para el modelamiento de la operación de los sistemas bajo estudio. Por razones de confidencialidad las ecuaciones del modelo matemático serán presentadas de forma descriptiva ya que este se encuentra en proceso de publicación , además, este modelo hace parte del estudio realizado por parte del grupo de investigación en Desarrollo de Investigación Operativa (DINOP) de la Universidad Tecnológica de Pereira, el cual tiene como objetivo desarrollar para la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) una "Herramienta de modelado y optimización para el análisis de la introducción de gas natural licuado a pequeña escala en distintos sectores de consumo final de energía en Colombia”.

2.1. Descripción general del problema

El GN es una fuente segura, de bajo costo y poco contaminante, lo cual le da un alto potencial como energético sustituto de combustibles costosos y contaminantes, como los son los derivados del petróleo. Esto, implica que el GN es un combustible ideal para facilitar la transición hacia matrices energéticas libres de carbono. Para esto, se requiere de herramientas de planeamiento que determinen las inversiones de mínimo costo, en la infraestructura necesaria para abastecer los requisitos de energía de los diferentes sectores productivos.

Para este planeamiento se desarrolló una metodología de optimización basado en modelos de operación, que simulan apropiadamente los sistemas considerados en el estudio, i.e. Red de transporte de GNT, cadena de suministro de GNL, el

sector transporte de carga pesada y el sector termoeléctrico. Los modelos de operación utilizados representan el comportamiento físico de los principales componentes de cada uno de los sistemas involucrados en el estudio. Además de esto, los modelos de operación están formulados para ser resueltos en tiempos de cómputo cortos garantizando optimalidad global, ya que las decisiones de inversión de estos modelos son determinadas por un algoritmo genético (AG), el cual debe estar en la capacidad de resolver múltiples veces los modelos operativos. En resumen, se cuenta con modelos operativos que representen apropiadamente los sistemas bajo estudio y que se pueden resolver rápidamente.

2.2. Descripción de la formulación matemática

En esta sección se presenta de forma descriptiva el modelo matemático implementado para la metodología de optimización, que permite el planeamiento holístico de la cadena de suministro de GNL considerando su impacto en los sectores de electricidad y transporte de carga pesada. Se describen las diferentes restricciones que representan el comportamiento operativo, tanto para el sistema de transporte de GNT, la cadena de suministro de GNL, el sector transporte de carga pesada y el sector termoeléctrico.

Este modelo operativo es un modelo de optimización de tipo lineal entero mixto, que, dado un plan de inversión, evalúa el comportamiento operativo de dicho plan de forma integrada para todos los sectores, ya que como se explica anteriormente cualquier decisión que se tome en uno de los sectores bajo estudio afecta de manera directa a los otros. El modelo operativo determina la factibilidad técnico-económica y los costos de inversión y operación de dichos planes de inversión, para un horizonte de planeación dado.

En términos generales el modelo matemático puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } F.O. = \begin{cases} z_i: \text{Costos de Inversión} \\ z_o: \text{Costos de Operación} \end{cases} \quad (2.1)$$

Este modelo está sujeto a los siguientes conjuntos de restricciones (2.2)-(2.5).
Representan el comportamiento físico de los sistemas bajo estudio:

s. a.

– Conjunto de restricciones cadena de suministro de GNT (2.2)

– Conjunto de restricciones cadena de suministro de GNL (2.3)

– Conjunto de restricciones sector transporte de carga pesada (2.4)

– Conjunto de restricciones sector termoelectrico (2.5)

En el modelo matemático, la ecuación (2.1) corresponde a la función objetivo la cual busca minimizar el valor presente de los costos de inversión y operación para un horizonte de planeamiento dado, donde:

La $F.O.$ (z_i) está asociada al costo total de inversión en infraestructura de la cadena de suministro de GNL y reemplazo de vehículos dentro de la ventana de planeamiento, estos costos están asociados a decisiones de inversión en:

- Estaciones de recarga
- Repotenciación de estaciones de recarga
- Vehículos nuevos dedicados a GNL
- Vehículos nuevos dedicados a diésel
- Estaciones satélite
- Repotenciación de estaciones satélite
- Módulos de licuefacción de GNL
- Infraestructura de almacenamiento de GNL
- Infraestructura de regasificación de GNL a pequeña y gran escala
- Tecnología de envío terrestre de GNL
- Infraestructura de importación de GN y GNL

La $F.O.$ (z_o) representa el costo total de operación de los sistemas bajo estudio dentro de la ventana de planeamiento. Estos costos de operación se derivan de las siguientes actividades dentro de las cadenas productivas:

- Consumo de diésel por parte del sector transporte de carga pesada
- Transporte de GN por tubería
- Consumo de GN por parte de los sectores industrial, comercial, residencial y termoeléctrico
- Corte de carga del sector de gas
- Licuefacción de GNL
- Importación de GNL
- Transporte terrestre para el abastecimiento del GNL
- Consumo de GNL por parte del sector termoeléctrico y transporte de carga pesada
- Regasificación de GNL a pequeña y gran escala

El conjunto de restricciones (2.2) modela la operación de la cadena de suministro de GNT y está basado en los modelos de la red de gas encontrados en la literatura [26],[27],[28]. Este conjunto de restricciones se puede desglosar de la siguiente forma:

- Restricciones que modelan la producción de GN en pozos y las estaciones de licuefacción de GNL
- Restricciones que modelan el balance de la red de GN
- Restricciones que modelan el comportamiento físico de los ductos de transporte de GN
- Restricciones que modelan el comportamiento físico de los compresores de GN
- Restricciones que representan los límites de flujo y presión de la red de GN

El conjunto de restricciones (2.3) modela la operación de la cadena de suministro de GNL. Este conjunto de restricciones se puede desglosar de la siguiente forma:

- Restricciones que modelan la producción y/o importación de GNL

- Restricciones que representan demandas existentes que basan su operación en otros combustibles, que son susceptibles a ser convertidas a GNL
- Restricciones que modelan la cadena de abastecimiento de GNL a las demandas nuevas o convertidas
- Restricciones que modelan el comportamiento físico de los elementos que conforman la cadena de suministro de GNL
- Restricciones que determinan los requerimientos operativos de cada uno de los elementos que conforman la cadena de suministro de GNL

El conjunto de restricciones (2.4) modela el comportamiento físico del sector transporte de carga pesada. Este conjunto de restricciones es el encargado de determinar, qué porcentaje de vehículos de transporte de carga pesada que se consideran chatarrizables (vida operativa mayor a 20 años, según resolución 332 de 2017 del ministerio de transporte), debe ser reemplazado por vehículos dedicados a GNL y qué porcentaje debe ser reemplazado por vehículos dedicados a diésel. Este conjunto de restricciones se puede desglosar de la siguiente forma:

- Restricciones que modelan el comportamiento físico del sector transporte de carga pesada
- Restricciones que determinan el porcentaje de vehículos que se reemplazan por vehículos dedicados a diésel
- Restricciones que determinan el porcentaje de vehículos que se reemplazan por vehículos dedicados a GNL
- Restricciones que determinan el consumo de GNL de los vehículos nuevos

Por último, el conjunto de restricciones (2.5) representa el comportamiento físico del sector termoeléctrico, este sector es modelado como una demanda de GN, demanda que actualmente es atendida por medio de la red de transporte de GNT y que es susceptible a ser atendida con GNL proveniente de una posible cadena de suministro de este combustible, es decir, el modelo está en la capacidad de determinar que medio logístico de transporte del GN (GNT o GNL) es el más económico para garantizar el abastecimiento de las necesidades energéticas de

estas demandas. En ese orden de ideas el conjunto de restricciones (2.5) es el encargado de determinar el porcentaje de la demanda termoeléctrica que será abastecido con GN y el porcentaje que será abastecido con GNL.

- Restricciones que modelan el comportamiento físico del sector termoeléctrico
- Restricciones que determinan el porcentaje de demanda termoeléctrica que se abastece con GN
- Restricciones que determinan el porcentaje de demanda termoeléctrica que se abastece con GNL
- Restricciones que determinan los requerimientos operativos de las demandas termoeléctricas que se abastecen con GNL

Capítulo 3

3. Metodología y técnica de solución

Los AG se basan en el proceso de selección natural que se presenta en la naturaleza, en el cual los individuos más aptos tienen mayor posibilidad de sobrevivir y transmitir su código genético a su descendencia. Desde el punto de vista matemático, un AG es una técnica de optimización combinatorial, que tiene una alta probabilidad de encontrar soluciones de buena calidad en problemas complejos, de gran tamaño y que cuentan con muchos óptimos locales.

Los AG son conocidos como métodos robustos y efectivos para la solución de problemas de optimización. Tradicionalmente, los problemas solucionados con este tipo de técnicas consideraban la optimización de una única función objetivo, sin embargo, en las últimas décadas se ha desarrollado una amplia gama de AG para resolver problemas multi-objetivos [29], lo cual hace que estas técnicas sean apropiadas para ser implementadas en problemas de optimización como el que se aborda en este estudio.

3.1. Optimización Multi-objetivo

La optimización multi-objetivo, también conocida como optimización de Pareto, es un área de la toma de decisiones con criterios múltiples, que se ocupa de los problemas de optimización que involucran más de una función objetivo y que a su vez deben ser optimizadas simultáneamente.

La mayor parte de los problemas de optimización aplicada son naturalmente multi-objetivos. Esto es, suelen tener dos o más funciones objetivo que deben satisfacer simultáneamente y que posiblemente están en conflicto entre sí. La existencia de múltiples funciones objetivos plantea una diferencia fundamental con

un problema mono-objetivo, ya que no existirá una única solución al problema, sino un conjunto de soluciones que plantearán diferentes compromisos entre los valores de las funciones a optimizar. Debido a esto, no existe una única solución que optimice simultáneamente cada objetivo. En ese caso, se tiene que las funciones objetivo son de naturaleza contradictoria y existe un número (que tiende al infinito) de soluciones Pareto-óptimas.

El principal motivo por el cual se usan algoritmos evolutivos en la solución de problemas de tipo multi-objetivo, radica en que al estar basados en población para realizar búsqueda de soluciones, éstos pueden explorar ampliamente el espacio de soluciones de manera eficiente y retornar un conjunto de soluciones de buena calidad, hecho que es de alta importancia en este tipo de enfoques [30].

Los algoritmos multi-objetivo se fundamentan en el concepto de no dominancia. Una solución se llama no dominada, óptimo de Pareto, Pareto eficiente o no inferior, si ninguna de las funciones objetivo se puede mejorar sin degradar algunos de los otros valores objetivos. Cabe resaltar que, sin información de preferencia subjetiva adicional, todas las soluciones óptimas de Pareto son consideradas equiparables [31].

3.2. Algoritmo Genético Elitista de Ordenamiento No Dominado (NSGA II)

El algoritmo NSGA-II o *Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II*, fue propuesto en el año 2000 por Deb *et al.* El algoritmo del NSGA II emplea un conjunto finito de soluciones del problema analizado, es decir, emplea una población inicial P_t de tamaño N que se conoce como población de padres, esta población es creada de dos formas, aleatoriamente o empleando algún tipo de algoritmo de inicialización, dependiendo del conocimiento que se tenga del problema. De esta población de padres es obtenida una población descendiente o también conocida como población de hijos Q_t de tamaño N a partir de la aplicación

de operadores genéticos; una vez conformado estos dos conjuntos se crea un conjunto de soluciones R_t que contiene las poblaciones P_t y Q_t con un tamaño de $2N$ [31]. La población R_t es clasificada en diferentes frentes a partir de la aplicación de los criterios de dominancia, los cuales son expuestos en [32], [33].

Para mayor comprensión de cómo se desarrolla esta técnica de optimización y su funcionamiento es necesario conocer conceptos como el de dominancia, distancias de apilamiento y operadores genéticos, los cuales son expuestos en [32], [33].

El algoritmo NSGA-II es de tipo elitista, esto lo hace ideal para ser implementado en este tipo de problemas multi-objetivo ya que incorpora mecanismos de preservación de las soluciones dominantes a través de varias generaciones. Se escogió esta técnica para la solución del problema de planeamiento de esta investigación dado las referencias reportadas en la literatura especializada de adaptaciones exitosas de este tipo de algoritmos de optimización a problemas de planeamiento con alta utilización de variables binarias.

3.3. Metodología propuesta

En este trabajo de grado se propone utilizar el algoritmo NSGA-II adaptado de [33], como técnica de solución para resolver el problema de planeamiento holístico de la cadena de suministro de GNL considerando su impacto en los sectores de electricidad y transporte de carga pesada. Se propone un modelo de optimización multi-objetivo para encontrar la frontera de Pareto. Para esto se consideran dos objetivos: 1) costos de inversión y 2) costos de operación. El espacio de solución factible está dado por el conjunto de restricciones descritas en el capítulo 2, las cuales representan el comportamiento físico de los sistemas bajo estudio.

La metodología decide qué tipo de infraestructura y cuándo se debe instalar para satisfacer las necesidades energéticas de los sistemas bajo estudio. En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo que describe la metodología propuesta.

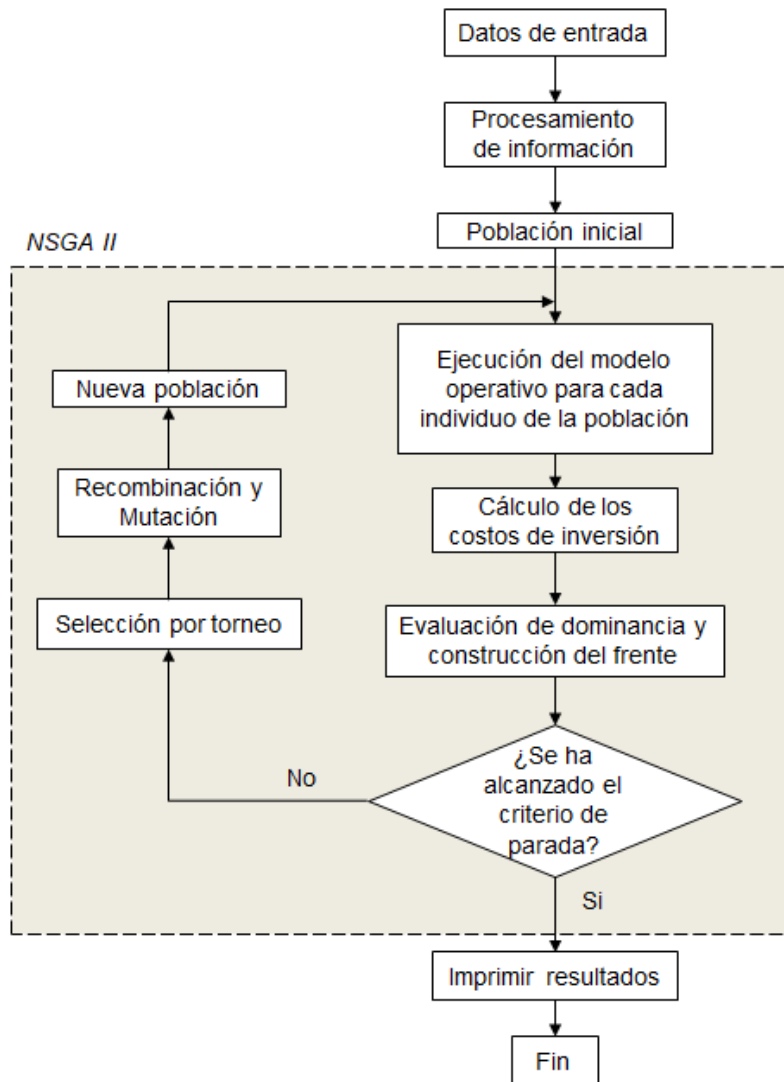


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología propuesta

En primera instancia se cargan los datos de entrada correspondientes a costos de inversión y operación, y a los parámetros del sistema. A continuación, se enlistan los principales datos de entrada para la metodología implementada:

Información general

- *Periodos de planeamiento*
- *Duración de los periodos de planeamiento*
- *Tasa de descuento anual*
- *Tasa de interés anual*

Información de combustibles

- *Tipos de combustibles*
- *Información asociada a costos de combustibles*
- *Información técnica asociada a los tipos de combustibles*
- *Proyección de consumo y precios por tipo de combustible*

Información del sector transporte de carga pesada

- *Principales corredores logísticos de mercancía*
- *Información de topología de las rutas utilizadas y factores de corrección de consumo*
- *Transito promedio diario de estos corredores logísticos*
- *Costos de inversión asociados al sector transporte de carga pesada*
- *Información técnica asociada al sector transporte de carga pesada*

Información de la cadena de suministro de GNL

- *Elementos que conforman la cadena de suministro de GNL*
- *Información asociada a costos de inversión en los elementos de la cadena de suministro de GNL*
- *Información asociada a costos de operación dentro de la cadena de suministro de GNL*
- *Información técnica asociada a la cadena de suministro de GNL*
- *Caracterización de la demanda susceptible a ser atendida a GNL (Industrial, comercial, residencial, termoeléctrico, transporte de carga pesada, demandas nuevas)*

Información de la cadena de suministro de GNT

- *Caracterización de la red de gas nacional*
- *Elementos que conforman la cadena de suministro de GNT*
- *Información asociada a costos de inversión en los elementos de la cadena de suministro de GNT*

- Información asociada a costos de operación dentro de la cadena de suministro de GNT
- Información técnica asociada a la cadena de suministro de GNT
- Caracterización de la demanda susceptible a ser atendida con GNT (Industrial, comercial, residencial, demandas nuevas)

Posteriormente, se lleva a cabo una etapa de procesamiento de la información de entrada para estandarizarla en el formato que recibe el modelo matemático (modelo operativo).

La población inicial se calcula de manera aleatoria, cada individuo está representado por un cromosoma que contiene la información de todas las propuestas de inversión. El cromosoma está formado por una matriz de dos filas y k columnas. Donde la primera fila representa la inversión (1) o no inversión (0) de los elementos de infraestructura propuestos y la segunda fila contiene el número del periodo de inversión en el que se construye cada tipo de infraestructura. En este mismo sentido, las columnas del cromosoma representan las diferentes propuestas de inversión, y se dividen en cuatro bloques que especifican el tipo de infraestructura, donde el primer bloque contiene inversiones asociadas a estaciones de recarga (ER) de vehículos que usan GNL, el segundo representa estaciones satélite (ES) que almacenan y distribuyen GNL a los usuarios de la cadena, y los últimos dos bloques corresponden a las inversiones asociadas a la importación de GNL para uso en fase líquida ($CARG_{BQ}$) y fase gaseosa (REG_{BQ}) respectivamente, tal y como se muestra en la Figura 3.

	ER					ES			$CARG_{BQ}$		REG_{BQ}		
Inversión	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
Periodo de Inversión	1	0	2	1	0	2	0	0	1	2	0	0	1

Figura 3. Ejemplo de un cromosoma y su codificación

Para cada individuo, se evalúan las dos funciones objetivo (z_o , z_i). El costo de operación se calcula mediante el modelo operativo, que determina la forma de

abastecer las necesidades energéticas de cada sector a costo mínimo. Para hacer esto, se utiliza el modelo matemático descrito en el capítulo dos. Los costos de inversión son calculados fuera de línea a partir de las decisiones de inversión propuestas para cada individuo.

Después de obtener el costo de inversión y el costo operativo para cada uno de los individuos, se determinan los individuos no dominados. Un individuo no dominado es un individuo de la población que es mejor que los otros individuos en al menos uno de los objetivos evaluados [32]. Una vez obtenidos los individuos no dominados, estos se organizan de modo que conformen una frontera (frente de Pareto). Posteriormente, los operadores de selección, recombinación y mutación son aplicados para crear la nueva población (población descendiente o población de hijos), este procedimiento se repite hasta que se cumpla el criterio de parada.

La forma en que se realizan las recombinaciones puede generar situaciones en las que se instalen estaciones de recarga pero no se instalen estaciones satélites, provocando que estas estaciones de recarga no cuenten con la posibilidad de ser abastecidas de GNL, en este caso no se considera esa situación como infactibilidad, dado que al no construirse alguna estación satélite pues lo que provocaría es que las estaciones de recarga no cuentan con suministro de GNL y a su vez no se podrían reemplazar vehículos chatarrizables por vehículos nuevos a GNL, en pocas palabras la metodología estaría detectando que estas estaciones de recarga estarían provocando sobre costos en la inversión mas no infactibilidades, de hecho este tipo de situaciones permiten que el metodología evolucione y determine que estas soluciones serán dominadas por soluciones de mejor calidad.

Capítulo 4

4. Resultados numéricos

De manera general, en este capítulo inicialmente se describen cada uno de los sectores bajo estudio que conforman el sistema de prueba (sector transporte de carga pesada, el sector termoeléctrico, la red de transporte de GNT y la cadena de suministro de GNL), el cual corresponde al caso colombiano, este sistema de prueba es utilizado con el fin de evaluar el desempeño de la metodología desarrollada en la investigación. Posteriormente se presenta la implementación de la metodología propuesta en el capítulo 3 al sistema de prueba, por último, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas a este sistema con el fin de analizar los beneficios de la metodología desarrollada en la investigación.

4.1. Sistema de prueba: Caso colombiano

En esta sección se describe el sistema de prueba utilizado para realizar las simulaciones de la metodología propuesta en la investigación, el cual busca caracterizar el sector transporte de carga pesada, el sector termoeléctrico y la red de transporte de GNT para el caso colombiano, también los elementos técnicos y operativos que forman la cadena de suministro de GNL.

Para este caso el horizonte de planeamiento es de 10 años, dividido en dos etapas o periodos de inversión de 5 años cada uno (2020-2024 y 2025-2029). Se debe aclarar que las decisiones de inversión en infraestructura que se propongan construir por parte de la metodología para cada periodo de inversión se asumirán que estarán operativas al inicio de cada uno de estos periodos, es decir a 2020 para el primer periodo de inversión y a 2025 para el segundo periodo de inversión.

Para cada periodo de inversión se cuenta con dos condiciones operativas, ya que el modelo matemático está formulado de forma tal que se considera que para cada año de cada periodo de inversión se presentan dos condiciones de oferta y de demanda GN, las cuales corresponden a condición de oferta y demanda alta y baja. Esto para garantizar que la metodología sea sensible ante diferentes escenarios que pueden ser representados por fenómenos naturales tan particulares del país como lo son el fenómeno del niño y de la niña, los cuales repercuten directamente en el consumo de GN de los distintos sectores productivos del país.

La información presentada en este sistema de prueba fue recaudada por los grupos de investigación DINOP y Genergética de la Universidad Tecnológica de Pereira, en conjunto con la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) en la elaboración del estudio *“Desarrollo de una herramienta de modelamiento y/o optimización para la introducción de gas natural licuado a pequeña escala en distintos sectores de consumo final de energía en Colombia”*.

4.1.1. Sector transporte de carga pesada

Actualmente en Colombia una de las mayores actividades productivas es el transporte de mercancía o de carga pesada por carretera, este gremio cuenta con alrededor de 324.874 vehículos registrados, estos vehículos utilizan diésel como combustible para su operación. Según la resolución 332 de 2017 del ministerio de transporte, se estima que los vehículos (camiones y tractocamiones) utilizados para la actividad del transporte de carga pasada cuentan con una vida útil de alrededor de 20 años, una vez cumplida la vida útil estos vehículos deben ser chatarrizados (salir de circulación) y ser reemplazados por vehículos nuevos. La metodología busca determinar en qué porcentaje se debe reemplazar los vehículos chatarrizados por vehículos dedicados a GNL y qué porcentaje por vehículos dedicados a diésel.

Teniendo en cuenta el parque automotor actual (2019) de camiones y tractocamiones, en la Tabla II se muestra el número de estos vehículos que se deben chatarrizar en cada periodo de inversión:

Tabla II. Número de vehículos chatarrizables

Tipo de vehículo	Número de vehículos a chatarrizar	
	Periodo de inversión 1	Periodo de inversión 2
Camiones	1260	12.664
Tractocamiones	312	3.128

Para determinar la infraestructura necesaria para garantizar las necesidades energéticas de este sector se debe tener en cuenta información adicional como:

- Principales corredores logísticos de mercancía en Colombia
- Transito promedio diario de camiones y tractocamiones por estos corredores logísticos
- Índices topográficos de los corredores logísticos
- Costos de inversión en vehículos nuevos a GNL y a diésel

En la Figura 4 se muestran los principales corredores logísticos de mercancía en Colombia según la resolución 164 de 2015 del ministerio de transporte, los cuales son considerados en el estudio, estos corredores logísticos corresponden a:

- Buenaventura – Cali
- Buenaventura – Lobo Guerrero
- Buenaventura – Mulaló
- Bogotá – Cali
- Bogotá – Villeta
- Bogotá – Barranquilla
- Bogotá – Bucaramanga
- Bogotá – Yopal
- Bogotá – Villavicencio
- Villavicencio – Arauca
- Villavicencio – Puerto Carreño
- Villavicencio – San José del Guaviare
- Medellín – Sincelejo

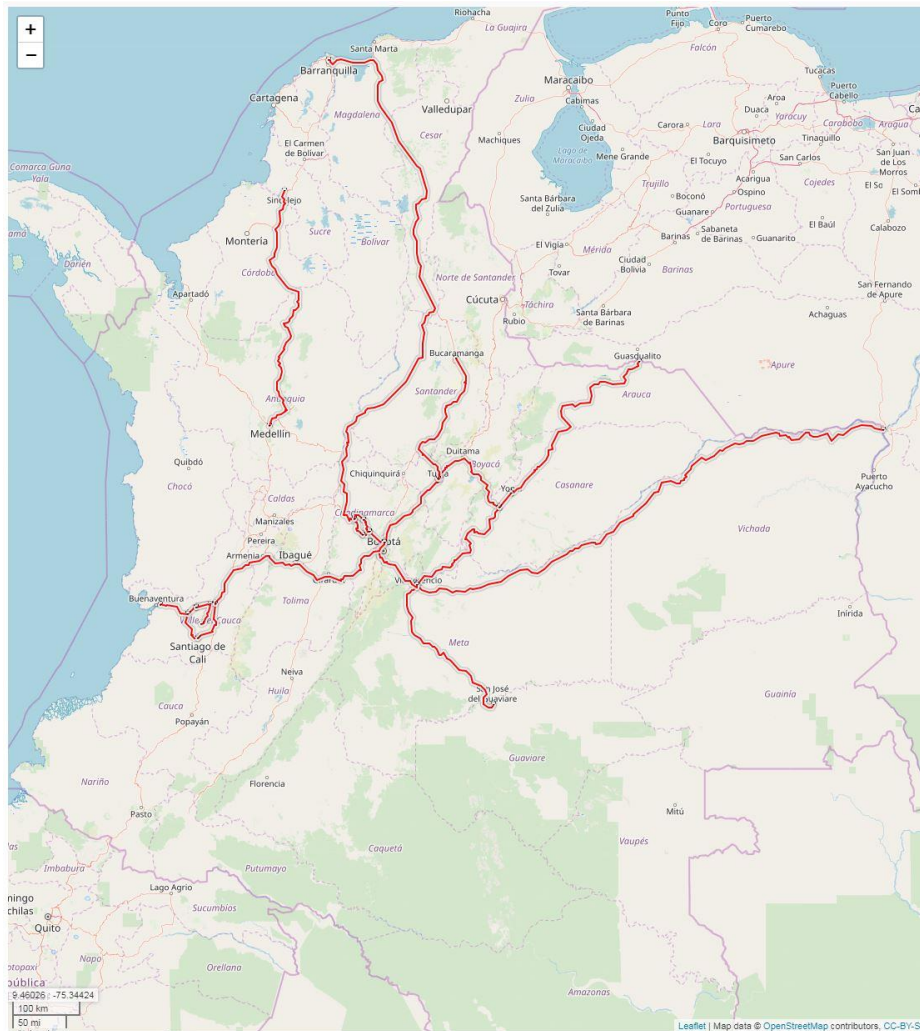


Figura 4. Corredores logísticos de mercancía considerados en el estudio

4.1.2. Sector termoelectrico

En la Tabla III se muestran las termoelectricas que son consideradas en el estudio, cabe resaltar que no todas son susceptibles a ser abastecidas con GNL, ya que actualmente las termoelectricas de la costa caribe (Riohacha, Barranquilla-Tebesa y TermoFlores) son abastecidas con GN que proviene de la planta de regasificación de SPEC LNG, lo cual representa una restricción técnica que imposibilita el suministro de GNL a estas demandas.

Las otras dos termoeléctricas que no se consideran en el estudio para ser abastecidas con GNL son Merielectrica y TermoDorada (ver Tabla III), esto debido a la poca demanda de GN que representan en comparación con las otras termoeléctricas. De esta forma en la Figura 5 se muestran las termoeléctricas que son consideradas para ser abastecida con GNL son Mamonal, TermoCentro, TermoSierra y TermoValle/EmCali.



Figura 5. Termoeléctricas susceptibles a ser abastecidas con GNL

Tabla III. Demandas termoeléctricas consideradas en el estudio

Termoeléctrica	Susceptible a ser abastecida con GNL
Riohacha	NO
Barranquilla-Tebsa	NO
TermoFlores	NO
Mamonal	SI
Merielectrica	NO
TermoCentro	SI
TermoSierra	SI
TermoDorada	NO
TermoValle/EmCali	SI

4.1.3. Red de transporte de GNT

La información técnico-económica de la red de transporte de GNT se fundamenta en el sistema colombiano. En resumen, este sistema está compuesto por 110 gasoductos, 114 nodos (entre los cuales se encuentran nodo de paso y nodos de demanda), 17 estaciones de compresión, 22 zonas de producción (pozos) de GN y 2 puertos de importación y regasificación de GNL, uno en la costa atlántica y uno en la costa pacífica.

En la Figura 6 se ilustra la red de transporte de gas natural por tubería colombiana utilizada en el estudio.



Figura 6. Red de transporte de GNT en Colombia

4.1.4. Cadena de suministro de GNL

Actualmente en Colombia no se cuenta con una cadena de suministro de GNL, por ello se debe alimentar a la herramienta con propuestas de infraestructura para cada uno de los elementos que conforman dicha cadena, la herramienta se encarga

de determinar qué elementos de infraestructura serán construidos y en qué periodo del horizonte de planeamiento se realizara dicha inversión. A continuación, se muestran las propuestas de infraestructura para la cadena de suministro GNL en Colombia.

Como se mencionó anteriormente, la red de transporte de GNT en Colombia cuenta actualmente con infraestructura de importación de GNL en la costa atlántica y próximamente también contará con este tipo de infraestructura en la costa pacífica, este GNL está siendo utilizado para ser regasificado e inyectado a la red de GNT, en este estudio se propone la posibilidad de utilizar este GNL que llega a estos dos puertos también para ser distribuido a posibles nuevas demandas de este combustible en el interior del país, de esta forma se cuenta entonces con la posibilidad de dos puntos de importación en la cadena de suministro de GNL para este estudio.

En cuanto al almacenamiento GNL y posible licuefacción de GN proveniente de la red de transporte de GNT, se cuenta con ocho diferentes propuestas de ubicación de estaciones satélite (ver Figura 7), es tarea de la metodología determinar cuáles de estas estaciones satélite serán construidas, en qué periodo del horizonte de planeamiento se realizará la inversión, con qué capacidad de almacenamiento se construirán y de ser así, también con qué capacidad de licuefacción de GN. Estas posibles estaciones satélites deben contar con acceso a la red de transporte de GNT en algún nodo de esta red, por ello para este estudio se proponen las siguientes ubicaciones:

Tabla IV. Posibles estaciones satélite de almacenamiento y licuefacción de GNL

Estación Satélite	Nodo de la red de transporte de GNT
Estación Heroica	Mamonal
Estación Curumaní	Curumaní
Estación Jobo	Jobo
Estación Barrancabermeja	CIB2
Estación Vasconia	Vasconia 2
Estación Padua	Padua
Estación Miraflores	Miraflores
Estación Buenaventura	Buenaventura

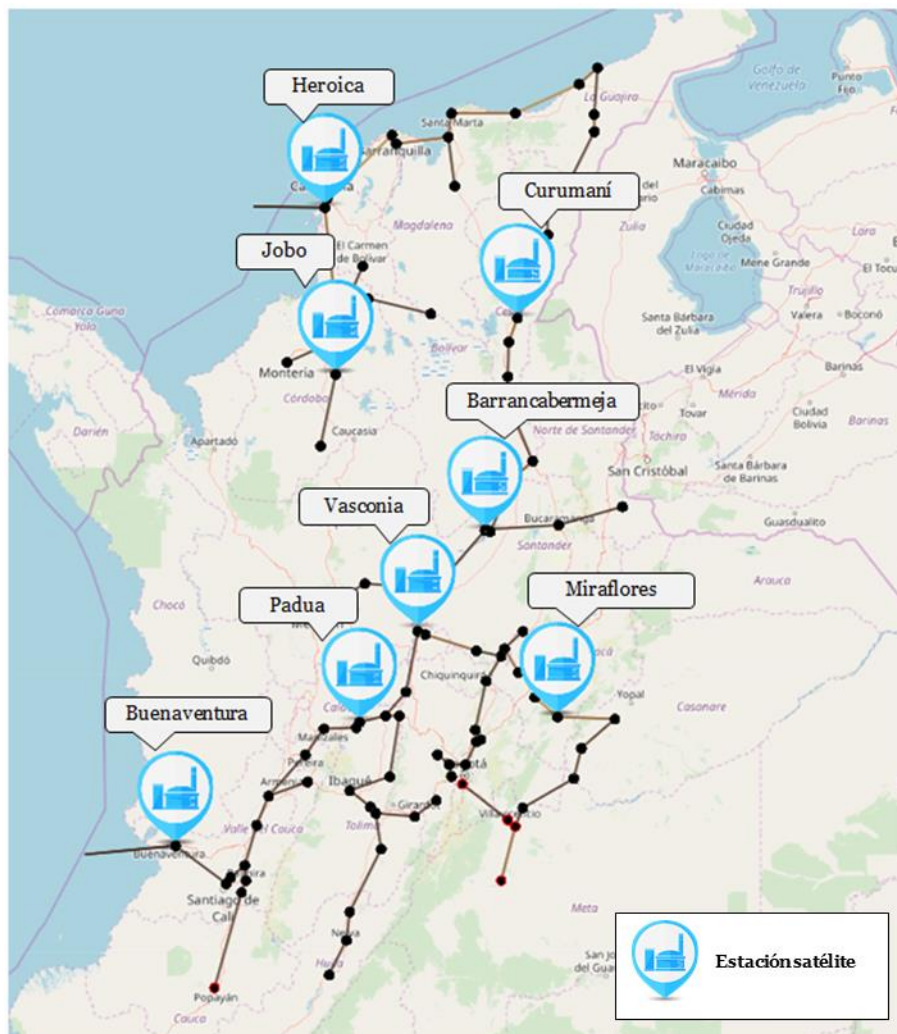


Figura 7. Propuesta de ubicación de estaciones satélite de almacenamiento y licuefacción de GNL

Para los vehículos del sector transporte de carga pesada que serán chatarrizados, y que el modelo indica que deben ser reemplazados por vehículos dedicados a GNL, se debe contar con la infraestructura necesaria para garantizar el abastecimiento de GNL a estos vehículos, abastecimiento que se realizará por medio de estaciones de recarga de este combustible. De esta forma, se proponen una amplia variedad de posibles ubicaciones de estaciones de recarga de GNL, las cuales se encuentran ubicadas sobre los corredores logísticos de mercancía mostrados anteriormente, al igual que para las estaciones satélite, es tarea de la metodología determinar cuáles de estas estaciones de recarga serán construidas, en qué periodo del horizonte de planeamiento se realizará la inversión y con qué capacidad de almacenamiento se construirán. Para ello, en este estudio se proponen los siguientes centros logísticos como posibles ubicaciones de estaciones de recarga de GNL:

- Cali (Valle del Cauca)
- Lobo Gurrero (Valle del Cauca)
- Buenaventura (Valle del Cauca)
- Media canoa (Valle del Cauca)
- Madronal (Valle del Cauca)
- Mulaló (Valle del Cauca)
- Buga (Valle del Cauca)
- Bogotá (Cundinamarca)
- El Rosal (Cundinamarca)
- Facatativá (Cundinamarca)
- Villeta (Cundinamarca)
- La Vega (Cundinamarca)
- Aguas Blancas (Santander)
- Boquerón (Cesar)
- Barranquilla (Atlántico)
- Tunja (Boyacá)
- Bucaramanga (Santander)
- Aguazul (Casanare)
- Yopal (Casanare)
- Villavicencio (Meta)
- Arauca (Arauca)
- La Primavera (Vichada)
- Puerto Carreño (Vichada)
- San José del Guaviare (Guaviare)

- Medellín (Antioquia)
- Sanguijuela (Antioquia)
- Sincelejo (Sucre)

4.2. Implementación de la metodología propuesta y resultados

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de la implementación de la metodología propuesta durante el desarrollo de esta investigación. Dichos resultados son obtenidos mediante el uso conjunto de las herramientas computacionales mostradas en el esquema de la Figura 8. Esta implementación fue realizada en un computador Intel® core (TM) i7-6700K con 32 GB de RAM y un sistema operativo Windows® 10 Professional.

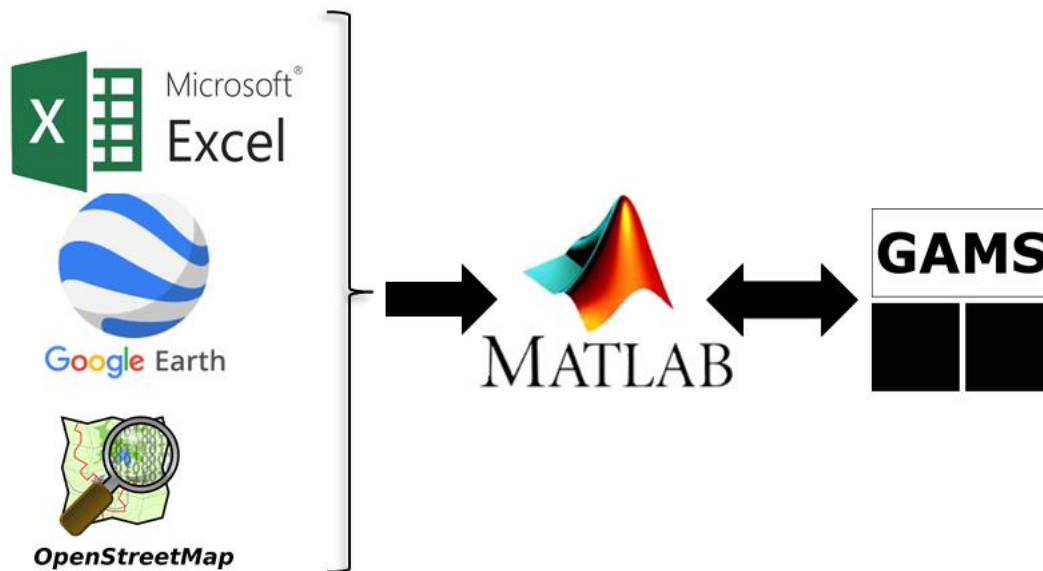


Figura 8. Esquema de utilización de las herramientas computacionales para el desarrollo de la investigación

En el desarrollo de esta investigación se utilizó MATLAB® para la implementación del algoritmo genético NSGA II, el cual es el encargado de determinar los planes de inversión que serán evaluados en el modelo operativo

según la metodología descrita en la sección 3.3, de igual forma MATLAB® cumple la función de ser el gestor del proceso, este se encarga inicialmente de leer y procesar la información de entrada que se encuentra consignada en Excel®, información que proviene de diferentes fuentes de recaudo como lo son Google Earth®, OpenStreetMap®, entre otros. Una vez procesada la información de entrada y reescrita en el formato previamente definido, esta información en conjunto con la población inicial de individuos generada por el algoritmo genético es enviada desde MATLAB® a el software de optimización comercial GAMS®, en el cual se encuentra implementado el modelo de optimización (modelo operativo) presentado en la sección 2.2, este modelo recibe la información proveniente de MATLAB® y es resuelto mediante el solver CPLEX® de IBM®.

Una vez resuelto el modelo de optimización, GAMS® envía la respuesta obtenida nuevamente al algoritmo genético, este se encarga de recibir dicha información para realizar la evaluación de las funciones objetivo y la determinación de los individuos no dominados, los cuales son los encargados de conformar el frente de Pareto, posteriormente el algoritmo genético realiza los procesos de selección, recombinación y mutación para crear la nueva población de individuos, la cual será enviada nuevamente a GAMS® para ser evaluada en el modelo de optimización, este proceso se repite hasta que se cumpla el criterio de parada. Finalmente, MATLAB® se encarga de procesar, ordenar y presentar los resultados obtenidos en el frente de Pareto.

Esta metodología es aplicada al sistema de prueba descrito en el numeral anterior, como se mencionó previamente el horizonte de planeamiento es de 10 años, dividido en dos periodos de inversión de 5 años cada uno y la oferta y demanda de GN se presenta para dos escenarios operativos (alto y bajo). Para el algoritmo NSGA II se utilizó una recombinación de 4 puntos, las tasas de recombinación y mutación utilizadas fueron de 90% y 30% respectivamente. La población inicial se crea aleatoriamente y cuenta con un tamaño de 30 individuos.

En la Figura 9 se muestra el frente Pareto-óptimo resultante. Este frente contiene 466 individuos diferentes no dominados. En la Tabla V se muestran los

resultados asociados a los puntos extremos del frente Pareto-óptimo, en otras palabras, se presentan los individuos del frente que corresponden al costo de inversión más bajo (I1) y al costo operativo más bajo (I2). En esta tabla, cada elemento de infraestructura cuenta con una numeración donde, el número cero “0” quiere decir que no se realizó ninguna inversión en dicho elemento, el número uno “1” que se realizó la inversión en este elemento en el primer periodo de inversión (PI1) y el número dos “2” que se realizó la inversión en el segundo periodo de inversión (PI2). Así mismo, las últimas dos columnas de la Tabla V muestran el porcentaje de individuos del frente Pareto-óptimo que realizaron inversiones en cada uno de los elementos de infraestructura para cada periodo de inversión. Por ejemplo, en el primer periodo de inversión, el 13.9% de los individuos del frente realizaron inversiones en la estación de recarga de GNL de Cali, mientras que en el segundo periodo de inversión, el 0% de los individuos del frente invierten en dicha estación de recarga.

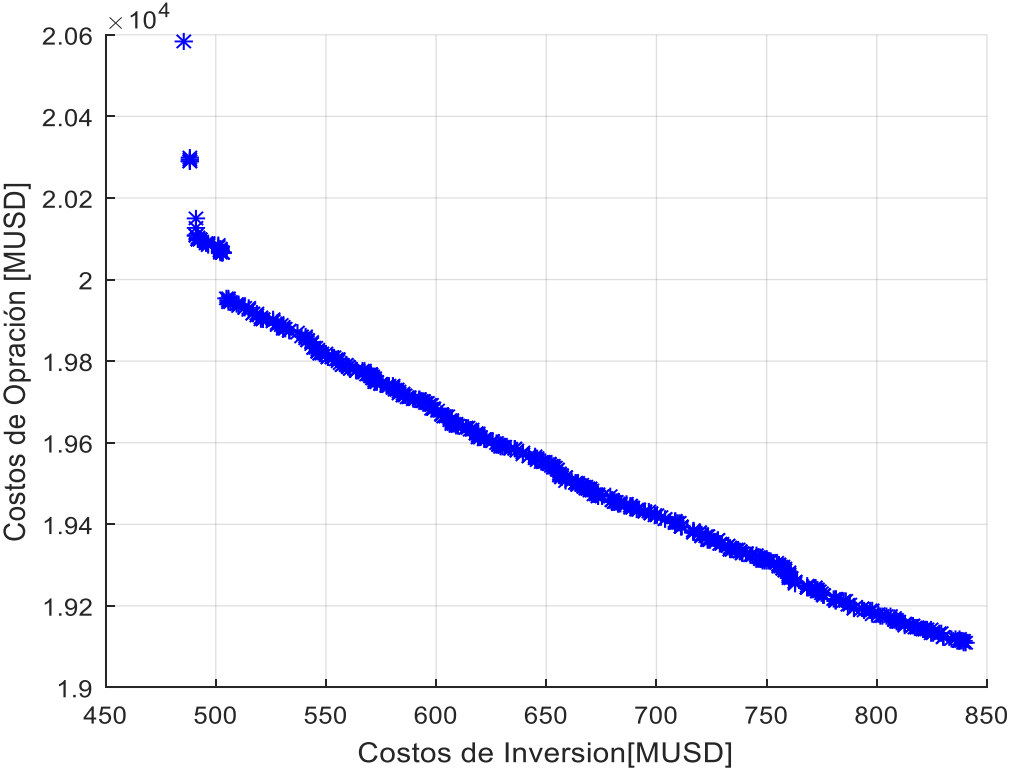


Figura 9. Frente de Pareto-óptimo

Tabla V. Resultados numéricos.

Elemento de infraestructura	I1	I2	Porcentaje de individuos en el frente de Pareto		
			PI1	PI2	
ER	Cali	0	1	13,9%	0,0%
	Lobo Gurrero	0	0	0,0%	2,8%
	Buenaventura	0	1	5,2%	0,0%
	Media canoa	0	0	6,0%	5,8%
	Madronal	0	0	0,6%	0,0%
	Mulaló	0	0	0,6%	0,0%
	Buga	0	2	21,5%	50,9%
	Bogotá	0	0	37,6%	0,0%
	El Rosal	0	2	0,0%	20,6%
	Facatativá	0	0	0,0%	1,9%
	Villeta	0	2	0,0%	12,4%
	La Vega	0	1	27,7%	0,0%
	Aguas Blancas	0	0	13,7%	0,2%
	Boquerón	0	1	33,7%	0,6%
	Barranquilla	0	0	6,9%	0,0%
	Tunja	0	1	29,2%	4,7%
	Bucaramanga	0	0	7,7%	0,6%
	Aguazul	0	1	62,9%	0,4%
	Yopal	0	0	8,6%	0,0%
	Villavicencio	0	1	73,4%	0,0%
Arauca	0	1	6,0%	0,0%	
La Primavera	0	1	75,5%	0,0%	
Puerto Carreño	0	0	11,8%	0,0%	
S. José del Guaviare	0	0	1,1%	0,0%	
Medellín	0	1	50,0%	9,7%	
Sanguijuela	0	0	0,6%	0,0%	
Sincelejo	0	0	0,0%	0,0%	
ES	Heroica	0	2	0,0%	60,3%
	Curumaní	0	0	8,8%	0,0%
	Jobo	0	1	74,5%	0,0%
	Barrancabermeja	0	0	0,0%	0,0%
	Vasconia	0	2	0,0%	12,0%
	Padua	0	0	0,4%	0,0%
	Miraflores	0	1	58,4%	0,0%
Buenaventura	0	1	68,7%	20,2%	
CARG_BQ	Cartagena	0	0	9,4%	25,8%
	Buenaventura	0	1	32,6%	53,0%

REG_BQ	Cartagena	1	1	100,0%	0,0%
	Buenaventura	2	1	34,8%	65,2%

De la Tabla V se pueden obtener los elementos de infraestructura que son transversales a la mayoría de los individuos del frente (ver Tabla VI), esta información le brinda al planificador un plan de ruta a seguir sobre los principales elementos de infraestructura que deben ser considerados a la hora de realizarse inversiones en la cadena de suministro de GNL.

Tabla VI. Infraestructura común en el frente de Pareto-óptimo

Elemento de infraestructura		Porcentaje de individuos en el frente de Pareto
ER	Buga	72.4%
	Aguazul	63.3%
	Villavicencio	73.4%
	La Primavera	75.5%
	Medellín	59.7%
ES	Heroica	60.3%
	Jobo	74.5%
	Miraflores	58.4%
CARG_BQ	Buenaventura	88.9%
REG_BQ	Buenaventura	85.6%
	Cartagena	100.0%
	Buenaventura	100.0%

En la Tabla V se muestra que la solución I1 (mínima inversión), solo realiza inversiones en infraestructura de importación de GN en Cartagena para el primer periodo de inversión y en Buenaventura para el segundo periodo de inversión, esto representa los requisitos mínimos de inversión para satisfacer las demandas de GN. Sin embargo, en cuanto a costos de operación I1 es el individuo con mayor costo, esto debido a que no se realiza inversión alguna en la cadena de suministro de GNL, significándole basar toda la operación de sector transporte de carga pesada en el consumo de diésel (ver Tabla VII), combustible que es más costoso que el GNL en términos de unidad de energía. Se evidencia que para esta solución (I1), se suple el 100% de las necesidades energéticas del sector termoeléctrico con

el sistema de transporte de GNT (ver Tabla VIII), ya que no se cuenta con ningún tipo de inversión en infraestructura para la cadena de suministro de GNL (ver Tabla V).

Tabla VII. Porcentaje de reemplazo de vehículos por tipo de combustible para I1

Tipo de vehículo	Porcentaje de vehículos reemplazados en PI1 a		Porcentaje de vehículos reemplazados en PI2 a	
	diésel	GNL	diésel	GNL
Camión	100%	0%	100%	0%
Tractocamión	100%	0%	100%	0%

Tabla VIII. Porcentaje de demanda termoeléctrica atendida por tipo de combustible para I1

Termoeléctrica	Porcentaje de demanda atendida con GNL	
	PI1	P12
Mamonal	0%	0%
TermoCentro	0%	0%
TermoSierra	0%	0%
TermoValle/EmCali	0%	0%

Por otra parte, la Tabla V muestra que la solución I2 realiza las inversiones en infraestructura necesarias para obtener el costo operativo más bajo del frente para todos los sistemas bajo estudio de forma integrada. Se destaca la importación de GN en Buenaventura, tanto en fase gaseosa como en su fase líquida (GNL), también la amplia inversión en infraestructura para la cadena de suministro de GNL, se invierte en 13 de las 27 posibles estaciones de recarga de GNL y en 5 de las 8 posibles estaciones satélite. Toda esta inversión en infraestructura le significa representar el extremo de mayor costo de inversión del frente Pareto-óptimo, pero le permite obtener una reducción en cuanto a costos operativos bastante atractiva en comparación con la solución I1. Esta reducción en los costos de operación tiene que ver con el hecho de que la infraestructura en la que se invierte para la cadena

de suministro de GNL, le permite lograr el reemplazo total de los vehículos a chatarrizar por vehículos dedicados a GNL (ver Tabla IX). En el caso del sector termoeléctrico se evidencia que la metodología encontró atractivo abastecer dos de las termoeléctricas contempladas en el estudio con GNL, en los porcentajes que se muestran en la Tabla X.

Tabla IX. Porcentaje de reemplazo de vehículos por tipo de combustible para I2

Tipo de vehículo	Porcentaje de vehículos reemplazados en PI1 a		Porcentaje de vehículos reemplazados en PI2 a	
	diésel	GNL	diésel	GNL
Camión	0%	100%	0%	100%
Tractocamión	0%	100%	0%	100%

Tabla X. Porcentaje de demanda termoeléctrica atendida por tipo de combustible para I2

Termoeléctrica	Porcentaje de demanda atendida con GNL	
	PI1	P12
Mamonal	0%	0%
TermoCentro	75,30%	100%
TermoSierra	0%	26,60%
TermoValle/EmCali	0%	0%

En el **Anexo 1** del documento se encuentra reportado los principales resultados obtenidos para la solución I2, esto para ilustrar el tipo de resultados que la metodología permite obtener para cada uno de los individuos del frente Pareto-óptimo, entre los que están la cadena de suministro de GNL propuesta para cada periodo de inversión, también se muestra el estado de la red de gas, el esquema de la cadena de valor de GNL, las unidades constructivas y el valor presente neto de los costos de inversión y operación.

Se simuló de manera individual este mismo caso, donde se fijaron en el modelo operativo las mismas decisiones en infraestructura que la solución I2, con la

diferencia que en este caso se le impidió al modelo el abastecimiento de GNL para las termoeléctricas (solución I2*). En la Tabla XI se puede observar que al imponer esta restricción de abastecimiento, el modelo encuentra que los costos de inversión son menores que los de la solución I2 ya que en este caso no se debe invertir en infraestructura de regasificación local para el GNL que llega a estas dos termoeléctricas, pero esto a su vez da como resultado un incremento en los costos de operación del sistema integrado, ya que como se evidencia en la Tabla XI, la metodología encuentra que es más económico en cuanto a los costos operación abastecer estas dos termoeléctricas con GNL. En cuanto a la función objetivo total (minimizar costos de inversión y operación), es más atractivo para el planificador la solución encontrada en I2, ya que esta es alrededor de 19 MUSD más económica que la solución dada por I2*.

Tabla XI. Costos

Costo	[MUSD]	
	I2	I2*
Inversión	840,2	809,7
Operación	19.111,6	19.161
Total	19.951,8	19.970,7

Si bien en la Figura 9 se observa que el diferencial en el frente de Pareto-óptimo entre el punto de mínima inversión y el de máxima inversión es de aproximadamente 400 MUSD, lo cual impactaría en reducir los costos de operación en el orden de 1000 MUSD, se debe de tener en cuenta que esta reducción de operación se encuentra en un horizonte de 10 años, lo cual genera un riesgo para el inversionista pues no hay garantías de que efectivamente las condiciones operativas bajo las cuales se hizo el análisis se van a mantener, ya que la metodología no está desarrollada para trabajar bajo incertidumbre, demostrando que el análisis multi-objetivo es pertinente pero evidenciando la necesidad de incorporar análisis estocástico a futuro.

De los casos analizados, se observa que la operación del sector transporte de carga pesada, impacta directamente los costos de operación del sistema integrado bajo estudio. En la Figura 10 se muestran dos curvas, la primera (curva azul) representa el número de vehículos nuevos dedicados a GNL proveniente del reemplazo de los vehículos a chatarrizar, contra los costos de operación del sistema integrado bajo estudio, la segunda (curva anaranjada) representa los costos de inversión contra los costos de operación del sistema. Con estas curvas se evidencia la tendencia de que a menor sea el número de vehículos nuevos dedicados a GNL, menor son los costos de inversión pero contrario a esto mayor es costo de operación del sistema, haciendo notoria una relación directa entre el número de vehículos nuevos a GNL y los costos de operación del sistema.

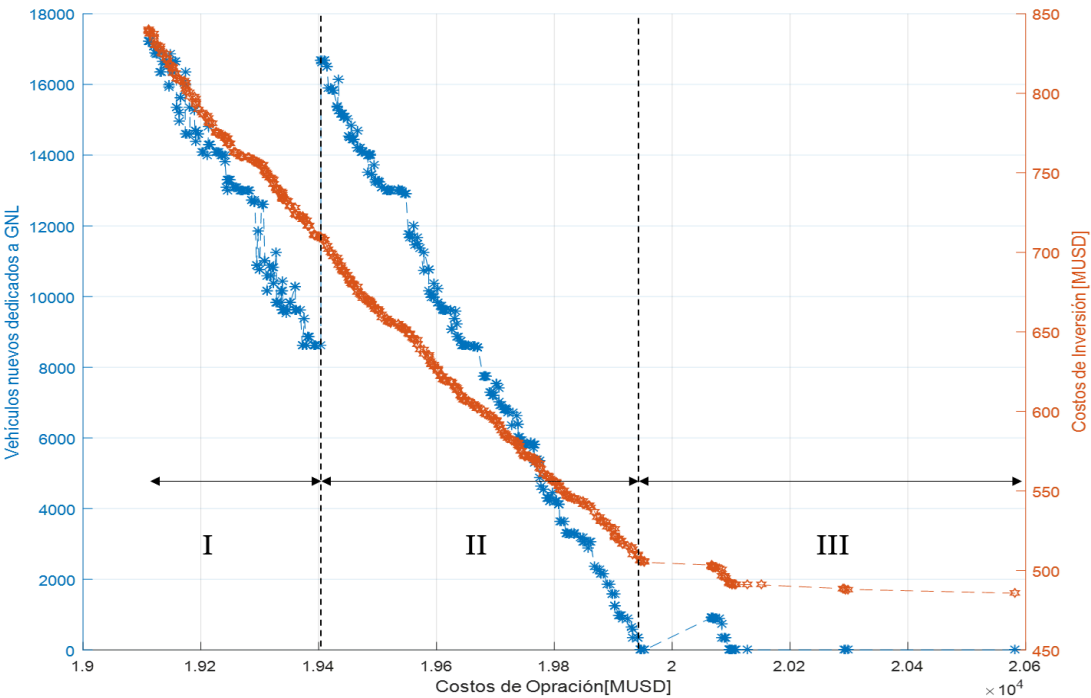


Figura 10. Curva de vehículos nuevos dedicados a GNL vs costos de operación

En la Figura 10, también se puede apreciar que la curva asociada al número de vehículos nuevos dedicados a GNL (curva azul), presenta un comportamiento que se puede dividir en 3 bloques de inversión (I, II y III), esto es debido a que dichos bloques son consecuencia de tres conjuntos de inversiones comunes en ES en el

frente. En la Tabla XII, se muestran las inversiones comunes en ES para cada uno de los bloques de inversión. Se considera como inversión común aquella infraestructura que aparezca en al menos el 50% de los individuos.

Tabla XII. Porcentaje de inversión en ES para cada bloque operativo

Bloque de inversión	Porcentaje de individuos en el bloque operativo que invierten en la ES							
	Heroica	Curumaní	Jobo	Barrancabermeja	Vasconia	Padua	Miraflores	Buenaventura
I	87.0%	9.3%	48.4%	0.0%	28.0%	1.2%	89.4%	100.0%
II	42.2%	1.1%	100.0%	0.0%	4.1%	0.0%	38.1%	81.3%
III	75.7%	62.2%	2.7%	0.0%	0.0%	0.0%	70.3%	94.6%

El primer bloque de inversión (I), está conformado por los 161 individuos con menores costos de operación del frente Pareto-óptimo, en este bloque de inversión prima la inversión en las ES Heroica, Miraflores y Buenaventura. La ES Miraflores es estratégica para la red de transporte de GNT, ya que esta ES produce el GNL a partir del GN que obtiene de la red, este GN proviene del yacimiento Aguazul (llanos orientales) el cual es actualmente el principal yacimiento de producción de GN en Colombia, pues allí se encuentran los pozos de Cusiana y Cupiagua. Por otra parte, las ES Heroica y Buenaventura son estratégicas para la cadena de suministro de GNL, ya que estas obtienen el GNL del mercado internacional, a un precio que podría llegar a ser atractivo en comparación con la licuefacción nacional de GN, esto debido a la gran proyección de exportación de GNL al mercado internacional [34].

El segundo bloque de inversión (II), está conformado por 286 individuos del frente Pareto-óptimo, estos individuos se ubican en la zona media del frente en cuanto a costos de inversión y de operación. Para este bloque operativo se considera como inversiones comunes la construcción de las ES Jobo y Buenaventura. Según la información suministrada por la UPME, el Jobo se proyecta en los próximos años como la segunda zona de producción de GN más grande de Colombia, GN que es tomado de la red de transporte de GNT por la ES Jobo para ser licuado y utilizado para abastecer las demandas de GNL. En este

bloque operativo prima la inversión en la ES de importación Buenaventura, esto obedece a criterios económicos y geográficos, ya que la ubicación geográfica de la ES Jobo es estratégica para abastecer las demandas de GNL del norte y centro del país, mientras que la ES Buenaventura es estratégica para abastecer las demandas de GNL del centro y sur.

Por último, el tercer bloque de inversión (III), está conformado por los 37 individuos del frente Pareto-óptimo que presentan los mayores costos de operación, esto debido a la baja inversión en vehículos nuevos dedicados a GNL (ver Figura 10). En este bloque prima la inversión en las ES Mamonal, Curumaní, Miraflores y Buenaventura. Las ES Curumaní y Miraflores producen el GNL a partir del GN que toman de la red de transporte de GNT, mientras que las ES Mamonal y Buenaventura obtienen el GNL del mercado internacional, estas ES son construidas para abastecer las necesidades energéticas de las demandas de GNL.

Este análisis de bloques de inversión le proporciona al planificador la opción de disponer de múltiples planes de inversión (Bloque de inversión I y II para este caso), que garantizan contar con la infraestructura necesaria para lograr el reemplazo total de los vehículos a chatarrizar, por vehículos nuevos dedicados a GNL, donde la elección entre un plan de inversión u otro y el porcentaje de vehículos que se desea reemplazar por vehículos nuevos dedicados a GNL dependerá de la inversión que se esté dispuesto a hacer en la cadena de suministro de GNL. Este análisis también es útil para identificar infraestructura con poca participación en las inversiones propuestas por los individuos del frente (ver Tabla XII), en este caso las ES Barrancabermeja, Vasconia y Padua, pueden ser descartadas como alternativas de inversión para una posible cadena de suministro de GNL. Este tipo de apreciaciones no se obtienen sino al evaluar todos estos sistemas de forma holística, tal y como se realiza en la metodología desarrollada.

Capítulo 5

5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

- En esta tesis, se logra desarrollar una metodología de planeamiento que a partir de la metodología de optimización multi-objetivo propuesta, integra de forma adecuada el sector transporte de carga pesada, el sector termoeléctrico y la red de transporte de GNT con el planeamiento de la cadena de suministro de GNL. Esta metodología permite encontrar el frente Pareto-óptimo que relaciona los objetivos de inversión y operación asociados a cada uno de los sectores productivos bajo estudio.
- La metodología detecta satisfactoriamente la ubicación y las capacidades de los elementos de infraestructura estratégicos para la reducción de los objetivos bajo estudio. En los resultados numéricos se observó que la metodología tiene la capacidad de detectar elementos de infraestructura comunes a la mayoría de los individuos del frente, lo cual da información altamente valiosa para guiar al tomador de decisiones hacia qué tipo de infraestructura implementar en la cadena de suministro de GNL.
- Los resultados numéricos muestran que, la metodología desarrollada permite encontrar la cadena de valor necesaria para garantizar que el usuario final del sector transporte de carga pesada, perciba un costo de GNL menor que el diesel, lo cual juega un papel importante en la reducción de los costos de operación del sistema integrado bajo estudio.

- La metodología dimensiona el potencial de demanda de GNL en todos los sectores bajo estudio y determina la cadena productiva que viabiliza el abastecimiento de dicha demanda potencial.
- Se determinó como la relación entre los costos de operación y de inversión reflejan diferentes cadenas de suministro de GNL, cadenas que a su vez están asociadas a efectos sobre cada uno de los sectores considerados en el estudio, lo cual permite entender como se están relacionando las variables de inversión en la cadena de suministro de GNL, con las variables de operación de todos los sectores bajo estudio y evidenciar que existe un impacto directo entre la infraestructura construida y la operación de estos sectores.
- Este tipo de metodologías es desarrollada para ser utilizadas por un planeador centralizado, el cual busca encontrar lo mejor para todos los sectores involucrados en el análisis y establecer las reglas para que cada de estos sector se vea atraído a realizar dichas mejoras. Las decisiones que se puedan tomar a partir de los resultados de esta metodología y los beneficios a los que esto conlleve requiere una serie de pasos regulatorios que guíen a los sectores a implementarlo.
- Se realizó un análisis en términos de energía, que busca garantizar el abastecimiento de las necesidades energéticas de todos los sectores involucrados en el estudio, en el caso particular del sector eléctrico, se evaluó la infraestructura necesaria para abastecer de energía primaria al sector termoeléctrico, como trabajos futuros se busca ampliar la participación de este sector por medio de la incorporación de la red eléctrica.

5.2. Recomendaciones y trabajos futuros

Según los objetivos alcanzados durante el desarrollo de este trabajo, se plantean los siguientes trabajos futuros:

- Desarrollar un enfoque estocástico que permita incorporar el efecto de la incertidumbre asociada a los precios y oferta de GNL en el planeamiento integrado de los sectores bajo estudio.
- Esta metodología se pensó para ser programada de forma modular, lo que permite integrar a la metodología propuesta otros sectores de interés para el estudio de los sistemas energéticos, como lo es el sistema eléctrico y todos los elementos relacionados con la movilidad eléctrica y energías renovables.
- Dado que los resultados numéricos muestran que el GNL es un combustible técnicamente viable y económicamente muy atractivo para sustituir el diésel, se hace relevante determinar el impacto ambiental que podría generar la sustitución masiva de diésel por GNL.
- Desde el punto de vista económico se evidencio el gran impacto que tendría la posible implementación de una cadena de suministro de GNL, en diferentes sectores de consumo de energía de un país en vía de desarrollo como es Colombia, lo cual demuestra el potencial que existe en una futura evaluación del impacto de la cadena de suministro de GNL en cuando a seguridad energética y confiabilidad.

6. Bibliografía

- [1] Shell Colombia (2019). Energía e innovación, Gas natural. Recuperado de: <https://www.eia.gov/beta/international/data/browser>.
- [2] International Energy Statistics (2019). Proved reserves of natural gas. Recuperado de: <https://www.eia.gov/beta/international/data/browser>.
- [3] S. Faramawy, T. Zaki, and A. A. E. Sakr, “Natural gas origin, composition, and processing: A review,” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 34. pp. 34–54, 2016.
- [4] S. Pfoser, O. Schauer, and Y. Costa, “Acceptance of LNG as an alternative fuel: Determinants and policy implications,” *Energy Policy*, vol. 120, no. May, pp. 259–267, 2018.
- [5] U.S. Department of Energy (2018). Clean cities: Alternative fuel, price report. Recuperado de: https://afdc.energy.gov/files/u/publication/alternative_fuel_price_report_jan_2018.pdf.
- [6] A. Arteconi, F. Polonara, “LNG as vehicle fuel and the problem of supply: The Italian case study”, *Energy Policy*, Vol. 62, 2013, pp. 503-512, ISSN 0301-4215.
- [7] Energy Information Administration. Clean power plan accelerates the growth of renewable generation throughout United States Today in Energy U.S. Recuperado de: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=26712>.
- [8] A. Sharafian, H. Talebian, P. Blomerus, O. Herrera, and W. Mérida, “A review of liquefied natural gas refueling station designs,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. September 2016, pp. 503–513, 2017.
- [9] H. Song, X. Ou, J. Yuan, M. Yu, C. Wang, ”Energy consumption and greenhouse gas emissions of diesel/LNG heavy-duty vehicle fleets in China based on a bottom-up model analysis”, *Energy*, Vol. 140, Part 1, pp. 966-978, 2017, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.011>.
- [10] Epeconomía.es (2018). Gasnam pide al Gobierno continuar con los incentivos a la movilidad con gas natural. Recuperado de: <https://www.europapress.es/economia/energia-00341/noticia-gasnam-pide-gobierno-continuar-incentivos-movilidad-gas-natural-20180830122334.html>.
- [11] Nova GNC (2017). Turquía difunde el uso de GNC en los vehículos. Recuperado de: <https://www.novagnc.com.ar/turquia-difunde-el-uso-de-gnc-en-los-vehiculos/>.
- [12] Gasnam (2018). China bate records en la producción de camiones de GNL. Recuperado de: <https://gasnam.es/china-bate-records-la-produccion-camiones-gnl/>.

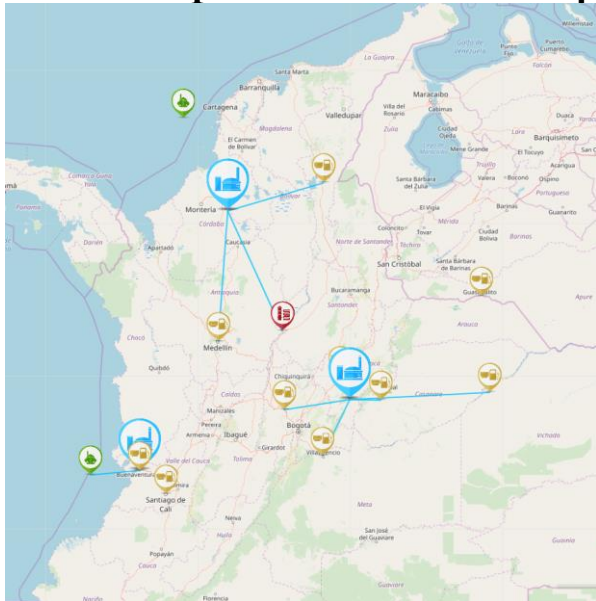
- [13] Novagas Criogenia. (2019). Plantas Satélite de G.N.L. Recuperado de: <http://novagascriogenia.com/portfolio/laoreet-mattis-quam-4/>.
- [14] J. Pospíšil, P. Charvát, O. Arsenyeva, L. Klimeš, M. Špiláček, J. Jaromír Klemeš, “Energy demand of liquefaction and regasification of natural gas and the potential of LNG for operative thermal energy storage”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 99, 2019, pp. 1-15, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.027>.
- [15] A. Arteconi, F. Polonara, “LNG as vehicle fuel and the problem of supply: The Italian case study”, *Energy Policy*, Vol. 62, 2013, pp. 503-512, ISSN 0301-4215.
- [16] R. Jokinen, F. Pettersson, H. Saxén, “An MILP model for optimization of a small-scale LNG supply chain along a coastline”, *Applied Energy*, Vol. 138, 2015, pp. 423-431, ISSN 0306-2619.
- [17] A. Bittante, F. Pettersson, H. Saxén, “Optimization of a small-scale LNG supply chain”, *Energy*, Vol. 148, 2018, pp 79-89, ISSN 0360-5442.
- [18] Stephen P.A. Brown, “Natural gas vs. oil in U.S. transportation: Will prices confer an advantage to natural gas?”, *Energy Policy*, Vol. 110, 2017, pp. 210-221, ISSN 0301-4215.
- [19] H. Xian, B. Karali, G. Colson, M. Wetzstein, “Diesel or compressed natural gas? A real options evaluation of the U.S. natural gas boom on fuel choice for trucking fletes”, *Energy*, Vol. 90, Part 2, 2015, pp. 1342-1348, ISSN 0360-5442.
- [20] S. Al-Haidous, M. Kais Msakni, M. Haouari, “Optimal planning of liquefied natural gas deliveries, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*”, Vol.69, 2016, pp. 79-90, ISSN 0968-090X.
- [21] Ye Li, Wenxiang Li, Yuewu Yu, Lei Bao, “Planning of LNG Filling Stations for Road Freight: A Case Study of Shenzhen”, *Transportation Research Procedia*, Vol. 25, 2017, pp. 4580-4588, ISSN 2352-1465.
- [22] D. Scheitrum, A. Jaffe, R. Dominguez-Faus, N. Parker, “California low carbon fuel policies and natural gas fueling infrastructure: Synergies and challenges to expanding the use of RNG in transportation”, *Energy Policy*, Vol. 110, 2017, pp. 355-364, ISSN 0301-4215.
- [23] C. Unsihuay-Villa, J. W. Marangon-Lima, A. C. Zambroni, I. J. Perez, P. Balestrasis, “A Model to Long-Term, Multiarea, Multistage, and Integrated Expansion Planning of Electricity and Natural Gas Systems”, *IEEE transaction on power system*, Vol. 25, NO 2, Mayo 2010.
- [24] EIA (Energy Information Administration). Shale oil and shale gas resources are globally abundant - Today in Energy - U.S, 2014. Available from: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=11611> [accessed 27.10.16].
- [25] EIA (Energy Information Administration). International Energy Outlook

2016. Available from: [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf) [accessed 27.10.16].

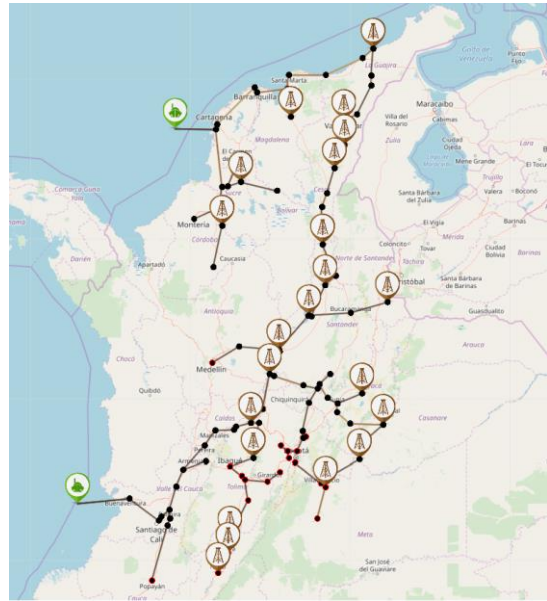
- [26] C. A. Saldarriaga, R. Hincapié, H. Salazar, “A multi-objective approach for planning power and natural gas distribution networks based on an evolutionary algorithm”, CBA, 2018.
- [27] C. A. Saldarriaga, H. Salazar, R. Moreno, G. Jiménez, “Integrated Planning of Electricity and Natural Gas Systems under Uncertain Hydro Inflows: A MultiObjective Approach”, GM, 2017.
- [28] C. A. Saldarriaga, R. Hincapié, H. Salazar, “A Multi-Objective Analysis for Planning Electric and Natural Gas Distribution Networks” PES, 2015.
- [29] S. Nesmachnow. Una versión paralela del algoritmo evolutivo para optimización multi-objetivo NSGA II y su aplicación al diseño de redes de comunicaciones confiables. Reportes Técnicos 04 - 03 INCO, 2004.
- [30] C. Correa Flórez, R. Bolaños, A. Molina. Algoritmo multiobjetivo NSGA-II aplicado al problema de la mochila. Scientia et Technica Año XIV, No 39, 2008.
- [31] E. F. Rosero. (2015). Reconfiguración de sistemas de distribución de energía eléctrica usando optimización Multi-objetivo (Tesis de maestría en ingeniería eléctrica). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- [32] R. Gallego, A. Escobar, E. Toro. (2008). Técnicas metaheurísticas de optimización. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira.
- [33] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," IEEE Transaction on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, Apr 2002.
- [34] El periódico de la energía. (2019). Vuelve el boom del GNL en los mercados internacionales. Recuperado de: <https://elperiodicodelaenergia.com/vuelve-el-boom-del-gnl-en-los-mercados-internacionales/>.

7.Anexo

Periodo de planeación 2020 – 2024



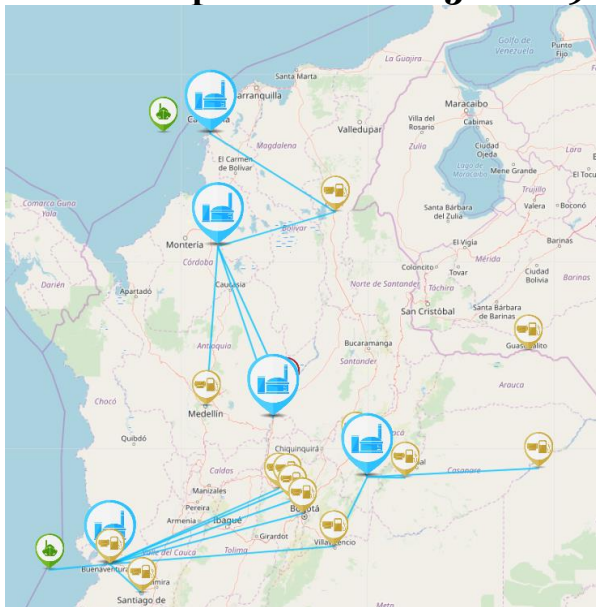
(a)



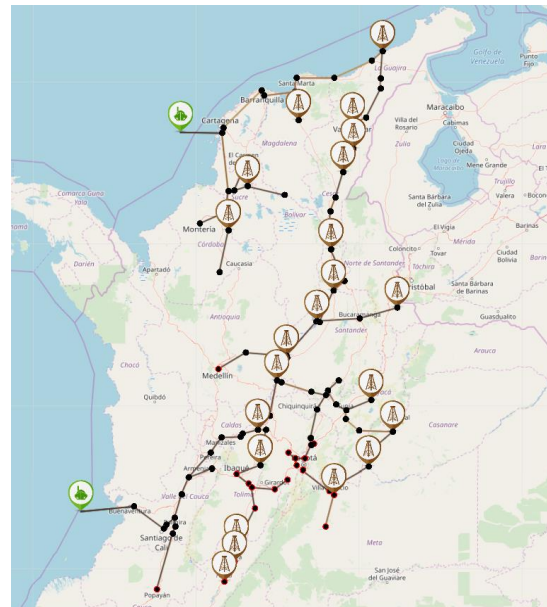
(b)

Figura 11. (a) Cadena de valor de GNL, (b) Red de transporte de GNT

Periodo de planeación 2025 – 2029



(a)



(b)

Figura 12. (a) Cadena de valor de GNL, (b) Red de transporte de GNT

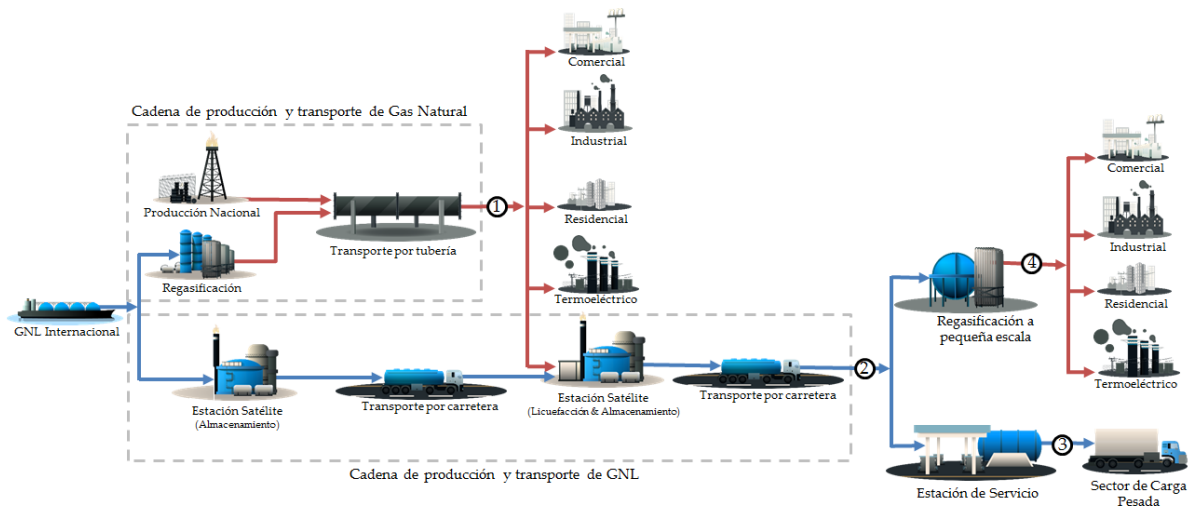


Figura 13. Esquema cadena de valor de GNL

En la Figura 13, se muestra el esquema de la cadena de valor de GNL propuesta por la metodología para la solución I2. En este caso, la cadena de valor de GNL se encuentra relacionada con la red de transporte de GNT ya que como se observa en la Figura 11 y Figura 12, el GNL que se suministra a las demandas proviene de los puertos de importación y de la licuefacción de GN en las estaciones satélite del interior del país.

En la Tabla XIII se muestran las unidades constructivas proporcionadas por la metodología para la cadena de suministro de GNL, en esta tabla se especifican con que capacidad y en qué periodo de inversión se deben construir los elementos de infraestructura. Si estos elementos deben ser repotenciados (aumentar su capacidad) la metodología también muestra el aumento de la capacidad y en qué periodo de inversión se debe realizar.

Tabla XIII. Unidades constructivas

Elemento	Capacidad instalada en MCL PI1	Capacidad instalada en MCL PI2	Repotenciación en MCL PI2
Estación de Recarga Cali	20	0	254,44
Estación de Recarga Buenaventura	20	0	132,84
Estación de Recarga Bogotá	0	161,95	0
Estación de Recarga El Rosal	0	20	0
Estación de Recarga Villeta	0	127,41	0
Estación de Recarga La Vega	20	0	0
Estación de Recarga Boquerón	38,86	0	389,55
Estación de Recarga Tunja	20	0	242,62
Estación de Recarga Yopal	20	0	171,9
Estación de Recarga Villavicencio	21,7	0	175,29
Estación de Recarga Arauca	20	0	0
Estación de Recarga La Primavera	20	0	0
Estación de Recarga Medellín	20	0	91,17
Estación Satélite Cartagena	0	20	0
Estación Satélite Jobo	8.700,24	0	0
Estación Satélite Vasconia	0	20	0
Estación Satélite Miraflores	178,97	0	1.245,81
Estación Satélite Buenaventura	34,58	0	2.101,81
Módulo de licuefacción Estación Satélite Cartagena	0	80	0
Módulo de licuefacción Estación Satélite Jobo	34.800,97	0	0
Módulo de licuefacción Estación Satélite Vasconia	0	40	0
Módulo de licuefacción Estación Satélite Miraflores	5.699,14	0	0

En la Tabla XIV se muestra el valor presente neto de los costos de inversión en los diferentes equipos y tipos de infraestructura dentro de la cadena de suministro de GNL.

Tabla XIV. Costos de inversión en infraestructura

Costo de inversión en	MUSD
puerto	92,29
Cargadero del puerto	0,81
Regasificación en puerto	118,67
Regasificación local	2,71
Almacenamiento local de GNL	3,37
Estaciones satélite	3,37
Módulos de licuefacción	1,92
Estaciones de recarga	4,66
Vehículos nuevos	603,83
Carros cisterna	8,57
Total	840,2

En la Tabla XV se muestra el valor presente neto de los costos de operación asociado a las diferentes actividades de los sectores productivos.

Tabla XV. Costos de operación

Costos de operación	MUSD
Diésel	0
GN nacional	10.862,54
GNL importado	5.049,62
Licuefacción de GNL	9,86
Transporte de GN por tubería	2832,48
Transporte de GNL por carretera	93,34
Regasificación en puerto	245,93
Regasificación local	17,84
Total	19.159,13