

Diseño y Optimización de la cadena de suministro para el aprovechamiento de gas de tea usando tecnologías a pequeña escala.

María Camila Duran Díaz

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Ingeniería Química

Director

Hernando Guerrero Amaya

PhD. en Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Codirector

Andrés Joaquín Calderón

PhD Ingeniería Química

Ariel Uribe Rodríguez

PhD Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Maestría en Ingeniería Química

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Cada uno de mis logros es por, para y gracias a ti madre

Agradecimientos

Primero que todo agradecer a Dios, mediante su voluntad se dieron las cosas para ingresar a esta Maestría y lograr llegar al final de la travesía, segundo a mi mamá mi gran apoyo, al resto de mi núcleo familiar, con quienes convivo a diario y me vieron trabajar en este proyecto, a mi director Hernando Guerrero, mi codirector Ariel Uribe, por depositar en mi la confianza y la oportunidad de sacar adelante esta investigación, a mi querido codirector Andrés Joaquín Calderón, por su apoyo incondicional a pesar de una que otra cana adicional que apareció, a mis compañeros, a la Universidad y Ecopetrol por permitir estas alianzas para aprender e investigar. Mis demás amigos que de alguna u otra manera hacen todo más ameno.

Tabla de contenido

1.Planteamiento del problema.....	17
2. Objetivos.....	21
2.1 Objetivo General.....	21
2.2 Objetivos Específicos.....	21
3.Definición del problema	22
3.1 Función objetivo	23
3.2 Beneficios Tributarios.....	26
3.3 Depreciación acelerada	26
3.4 Costos Operativos	27
3.5 Costos de Producción.....	27
3.6 Costos de Relocalización	27
3.7 Ingresos	28
3.8 Valor de Salvamento.....	28
3.9 Logística de plantas modulares.....	28
3.10 Balance de masa.....	29
3.11 Gas disponible para procesamiento	30
3.12 Productos.....	30
3.13 Restricciones del modelo matemático	30
3.13.1 Restricciones de capacidad	30
3.13.2 Restricciones de disponibilidad	31
3.13.3 Restricciones de relocalización.....	31
3.14 Potencial de descarbonización	32

4.	Caso De Estudio.....	33
4.1	Tecnologías de conversión.....	36
4.1.1	Tecnologías modulares Gas a líquidos (GTL).....	37
4.1.2	Turbinas modulares.....	38
4.2	Costos capitales.....	41
4.3	Rendimiento de las tecnologías	42
4.4	Infraestructura de transporte	43
4.5	Precio de los productos	46
4.5.1	Combustibles Líquidos	46
4.5.2	Energía eléctrica.....	47
4.6	Flujos de Gas de las teas	47
4.7	Beneficios tributarios	50
5.	Estrategia de solución Basada en Clústeres	52
6.	RESULTADOS.....	56
6.1	Casos de Análisis	57
6.2	Maximización del Valor Presente Neto	57
6.3	Análisis de Sensibilidad.....	64
6.4	VPN y Relocalización de las plantas	69
7.	CONCLUSIONES	73
8.	RECOMENDACIONES.....	74
	Bibliografía	76
	Apéndices	83

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Empresas con tecnologías modulares GTL.	39
Tabla 2. Empresas con turbinas modulares.....	40
Tabla 3. Características de las tecnologías utilizadas en el modelo	43
Tabla 4. Flujo de gas de las teas, 2012-2021	49
Tabla 5. Tecnologías compradas en cada caso	59
Tabla 6. Variables análisis de sensibilidad	65
Tabla 7. Variables sensibilizadas mayor VPN.....	69

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Cadena de suministro de tecnologías móviles para la quema en tea.....	19
Figura 2. Etapas de desarrollo metodología.....	23
Figura 3. Flujo de gas de tea en Colombia 2012-2021	36
Figura 4. Regresión logarítmica para estimar precios plantas GTL	42
Figura 5. Estimación costos de capital turbinas.....	42
Figura 6. Estimación costo del transporte de las tecnologías móviles de una tea hacia otra.....	44
Figura 7. Mapa ubicación de las teas en Colombia	45
Figura 8. Ejemplo del reporte de gas de quema del Flaring Tracker del Banco Mundial 2021 ...	48
Figura 9. Diagrama de flujo estrategia Clúster. Consistente en encontrar las variables que generan un impacto en el procesamiento de datos del modelo y a partir de ellas generar clústeres o grupos de datos para encontrar una solución factible y a partir de esta encontrar la solución.	54
Figura 10. Resultados estrategia clústeres. Usada para reducir el tiempo de procesamiento del modelo.....	55
Figura 11. Resultados Valor Presente Neto caso con beneficios económicos y caso sin beneficios económicos.	58
Figura 12. Comparación resultados comportamiento de quema de gas casos sin beneficios económicos (a) y con beneficios económicos (b).....	61
Figura 13. Comparación resultados Volumen de Gas Procesado en cada escenario, con beneficios económicos y sin beneficios económicos	62

Figura 14. Comparación generación de emisiones de CO ₂ actuales vs mejor y peor escenario de VPN.....	63
Figura 15. Potencial de descarbonización de las tecnologías Turbina y GTL en el mejor y peor escenario	64
Figura 16. Resultados comportamiento variables del modelo frente a los parámetros sensibilizados mediante el GSA.....	67
Figura 17. Histograma variación VPN en GSA.....	68
Figura 18. Resultados de las variables económicas en función de la movilidad de las plantas para el mejor y peor escenario del GSA	70
Figura 19. Movimientos de las plantas mejor y peor escenario.....	71
Figura 20. Aplicación SiceTac para estimar costos de transporte	97

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Nomenclatura.....	83
Apéndice B. Información técnica de las tecnologías	86
Apéndice C. Estimación de costos de transporte	97
Apéndice D. Conexión entre teas.....	99

Glosario

Cadena de Suministro: Conjunto de actividades, instalaciones y medios de distribución necesarios para llevar a cabo el proceso de venta de un producto en su totalidad.

GTL: Gas a líquido, conocido por sus siglas en inglés GTL (Gas To Liquid), es un proceso para convertir gas natural u otros hidrocarburos gaseosos en hidrocarburos de cadena más larga, como gasolina o diésel. Los gases ricos en metano se convierten en combustibles líquidos sintéticos.

Modelo matemático: Es un modelo que utiliza fórmulas matemáticas para representar la relación entre distintas variables, parámetros y restricciones.

Optimización Determinística: Tipo de optimización que carece de incertidumbre, es decir, todos los cambios de estado del sistema se pueden predecir con certeza, y su comportamiento se evalúa con medidas de efectividad o eficiencia tales como: Costos, tiempo y utilidades.

Programación Lineal Entera Mixta: Son problemas lineales en los cuales se definen tanto variables enteras como variables continuas para su resolución.

Pyomo: Es una colección de paquetes de software de Python para formular modelos de optimización.

Tea: Es la última línea de defensa en un sistema de liberación segura de emergencia en una refinería o planta química. Se utiliza para disponer de productos purgados o de desperdicio resultantes de refinerías, gases imposibles de recuperar de pozos petroleros, gases emitidos de altos hornos, gases sin utilizar de hornos de coquización y agua gaseosa de industrias químicas.

Turbina: Son máquinas motrices de flujo continuo que producen trabajo mecánico mediante un sistema de álabes de formas diversas empleando la energía cinética, térmica o de presión de un fluido.

VPN: Corresponde a las siglas de Valor Presente Neto, incorpora el valor del dinero en el tiempo en la determinación de los flujos de efectivo netos del negocio o proyecto, con el fin de poder hacer comparaciones correctas entre flujos de efectivo en diferentes periodos a lo largo del tiempo.

Resumen

Título: Diseño y Optimización de la cadena de suministro para el aprovechamiento de gas de tea usando tecnologías a pequeña escala*

Autor: María Camila Durán Díaz**

Palabras Clave: Programación Lineal Entera Mixta, Cadena de Suministro, Quema de gas, Plantas Modulares, Gas a Líquido, Gas a Energía.

Descripción:

En 2015, el Banco Mundial lanzó la iniciativa Global Gas Flaring Reduction Partnership, destinada a reducir la quema regular de gas en los procesos de producción de petróleo. Según el Banco Mundial, anualmente en el mundo se queman alrededor de 140 miles de millones de m³ de gas (condiciones estándar), equivalente a 350 Mt de CO₂ y 16 mil MUSD (Banco Mundial, 2022; Energy5 Your Way, 2023). En Colombia, en el 2022, se quemaron 244 Mm³ de gas, equivalente a 680k tCO₂ y 28 MUSD. Actualmente, el desarrollo de tecnologías modulares móviles, como mini GTL (gas a líquido) o microturbinas (gas a electricidad), ha alcanzado una fase de comercialización con potencial para monetizar gas de tea.

Esta investigación propone un modelo multiperiodo de programación lineal entera mixta (MILP) para monetizar el gas de tea. El modelo diseña infraestructura para asignar y relocalizar las plantas móviles que transforman el gas de tea en productos de valor agregado como combustibles y electricidad, maximizando el Valor Presente Neto (VPN). Se conocen el perfil de disponibilidad de gas de tea y su ubicación georreferenciada, la infraestructura de transporte terrestre existente e información de las tecnologías móviles (capacidad de procesamiento, costos de inversión y operativos).

Se desarrolló un caso de estudio, considerando 55 campos de producción agrupados en 35 teas distribuidas en el territorio colombiano, con un potencial de aprovechamiento de 480 Mm³ de gas en un horizonte de planeación de 10 años, discretizado en 40 periodos (trimestres). Se consideraron microturbinas y plantas mini GTL para producir Diésel y gasolina. El modelo se implementó en Pyomo, y se optimiza con Gurobi v 10.0.1. El diseño óptimo consiste en instalar 61 microturbinas con capacidad total de 320MW y 5 plantas mini GTL que producen 204 kbbbl de combustible. Se obtiene un VPN de 301.7 MUSD, aprovechando 64% del gas de tea y reduce en un 20% las emisiones de CO₂.

* Diseño y Optimización de la cadena de suministro para el aprovechamiento de gas de tea usando tecnologías a pequeña escala.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Hernando Guerrero Amaya, PhD. Codirector: Andrés Joaquín Calderón, PhD. Ariel Uribe Rodríguez, PhD

Abstract

Title: Design and Optimization of a Supply Chain for The Utilization of Gas Flaring Using Small-Scale Mobile Technologies *

Author(s): María Camila Durán Díaz**

Key Words: Mixed integer linear programming; Supply Chain; Gas Flaring; modular plants, gas to liquids, gas to power.

Description: In 2015, the World Bank launched the Global Gas Flaring Reduction Partnership initiative, aimed at reducing regular gas flaring in oil production processes. According to the World Bank, around 140 billion m³ of gas is flared annually in the world (standard conditions), equivalent to 350 Mt of CO₂ and 16 thousand MUSD (Banco Mundial, 2022; Energy5 Your Way, 2023). In Colombia, in 2022, 244 Mm³ of gas were flared, equivalent to 680k tCO₂ and 28 MUSD. Currently, the development of mobile modular technologies, such as mini GTL (gas-to-liquid) or microturbines (gas-to-electricity), has reached a commercialization phase with potential to monetize fire gas.

This research proposes a multi-period mixed integer linear programming (MILP) model to monetize tea gas. The model designs infrastructure to allocate and relocate mobile plants that transform tea gas into value-added products such as fuels and electricity, maximizing the Net Present Value (NPV). The availability profile of tea gas and its geo-referenced location, the existing land transportation infrastructure and information on mobile technologies (processing capacity, investment and operating costs) are known.

A case study was developed, considering 55 production fields grouped in 35 fields distributed in the Colombian territory, with a potential exploitation of 480 Mm³ of gas in a planning horizon of 10 years, discretized in 40 periods (quarters). Microturbines and mini-GTL plants were considered to produce diesel and gasoline. The model was implemented in Pyomo, and optimized with Gurobi v 10.0.1. The optimal design consists of installing 61 microturbines with total capacity of 320MW and 5 mini-GTL plants producing 204 kbbbl of fuel. An NPV of 301.7 MUSD is obtained, taking advantage of 64% of the fire gas and reducing CO₂ emissions by 20%.

* Design and Optimization of a Supply Chain for The Utilization of Gas Flaring Using Small-Scale Mobile Technologies

**Faculty of Physical-Chemical Engineering. Chemical Engineering School. Director: Hernando Guerrero Amaya, Ph.D. Codirector: Joaquín Andrés Calderón, PhD. Ariel Uribe Rodríguez, PhD

Introducción

Se prevé que el gas natural se convierta en una de las principales fuentes de energía e hidrocarburos del mundo a finales de este siglo (Vladimir S. Arutyunov et al., 2015). La abundancia de recursos y los bajos costos hacen que el gas natural resulte muy atractivo como materia prima petroquímica. Sin embargo, estos nuevos recursos de hidrocarburos están distribuidos en grandes áreas y sus fuentes suelen tener una producción y una vida útil bajas, lo que causa que el desarrollo de infraestructura convencional para el transporte y el procesamiento de estos recursos no sea factible económicamente.

En muchos casos se ve la necesidad de que el gas sea quemado por razones de seguridad, falta de incentivos financieros o para poder acceder a los recursos petroleros que se consideran productos de mayor valor en el mercado. (Holly Young, 2022). Estos gases que requieren ser quemados representan un impacto ambiental alto y pérdidas económicas para la industria, que motivados principalmente por las regulaciones ambientales han generado una necesidad de tecnologías flexibles y a pequeña escala que permitan el procesamiento y aprovechamiento de este gas quemado que se adapten a la naturaleza de estos recursos y generen productos de valor agregado.

La quema de gas sigue siendo considerada un método económico, relativamente seguro, aunque contaminante, para eliminar el gas asociado a los procesos petrolíferos (Banco Mundial, n.d.). Los principales obstáculos a los que se enfrenta la reducción del gas de tea son:

- 1) Volumen y calidad, la mayoría de las fuentes producen un volumen escaso que implica escalas de tecnologías no tan comunes en el mercado. Además, en algunos casos las

tecnologías que ofrece el mercado para aprovechar este gas quemado en tea, requieren de un pretratamiento lo cual implica inversiones en infraestructura y costos operativos.

2) Ubicación, transporte y distribución, los campos de extracción o campos de gas natural donde se encuentran las teas, no tienen redes de transporte y distribución de gas o de transmisión de electricidad, por lo cual los costos se ven sustancialmente afectados. (Ayuso, 2017)

Como resultado de estos obstáculos, los avances en las tecnologías de utilización del gas a pequeña escala también han mejorado significativamente el potencial de utilización del gas quemado en tea en los últimos años. Las ventajas económicas de estas tecnologías dependen en gran medida del flujo de gas de entrada y de los precios del producto final. Las pequeñas centrales eléctricas, las plantas de gas natural licuado y/o de conversión de gas en líquidos y los sistemas integrados de gas natural comprimido suelen ser alternativas fiables a la quema en tea, pero pueden resultar caros e incluso deficitarios para el operador. (Banco Mundial, s.f.) (Wood et al., 2012)(Laura et al., 2018)

En vista de estos retos, sería útil e informativo para las partes interesadas de la industria tener acceso a una metodología que oriente sobre cómo utilizar de forma óptima las tecnologías móviles a pequeña escala para monetizar el gas de tea. La elaboración de un modelo matemático permite representar los aspectos esenciales de un sistema real, así mismo ayuda a predecir el comportamiento de sucesos de interés que aún no se han desarrollado, pero se prevén van a suceder.(Dim, 2004)

Con este fin, se desarrolló un modelo Multiperiodo de Programación Lineal Mixta Entera (MILP) para la asignación óptima de estas tecnologías móviles teniendo en cuenta la ubicación y conexión entre los posibles suministros de gas y las tecnologías de producción de electricidad y transformación en productos de mayor valor, como gasolina o diésel.

La implementación de tecnologías móviles para aprovechar el gas de tea en un contexto regional y/o nacional requeriría la integración de tres componentes principales: los costos de adquisición de tecnología, la optimización de la producción y el transporte de las plantas. Técnicas de optimización basadas en programación matemática ofrecen una metodología sistemática para abordar este tipo de problemas. Por ejemplo, el diseño de cadenas de suministro para la producción de biocombustibles, petróleo y gas ha sido relevante ya que se conoce que la implementación de un diseño de cadena de suministro reduce costos de operación y aumenta los beneficios económicos (Blue Ocean Corporation, n.d.; Lisitsa et al., n.d.; Osama Abdelaziem, 2023). Para el caso de las tecnologías móviles, se debe proponer un modelo matemático que considere la selección (capacidad, costo, condiciones de operación), ubicación y relocalización de tecnologías para la valorización del gas y logística de transporte, orientadas hacia la maximización del valor presente neto.

En otros casos, se han aplicado técnicas de optimización multiobjetivo para el diseño y planificación óptimos de cadenas de suministro de combustibles considerando no sólo el rendimiento económico, sino también aspectos ambientales y sociales (Calderón & Pekney, 2020; Gao & You, 2017; Guerra et al., 2018; (Tan & Barton, 2015, 2016)(Guerra et al., 2019). En cuanto a las cadenas de suministro para el aprovechamiento del gas de tea, Tan & Barton propusieron un modelo para el diseño óptimo de una cadena de suministro para producir combustibles líquidos o

gas natural licuado, maximizando el beneficio económico.(Tan & Barton, 2015). Según los autores, se obtiene un beneficio económico de 1730 millones de dólares en un horizonte de 20 años, considerando que las inversiones se recuperaban en dos años. Es importante resaltar que la movilidad de las tecnologías se identificó como un aspecto clave en el impacto económico de la cadena de suministro, siendo predominantes las tecnologías minis GTL. Sin embargo, esto es dependiente del caso de estudio en particular que se esté evaluando. Por ejemplo, en el contexto colombiano no podría asegurarse si las tecnologías minis GTL son la alternativa óptima para valorizar el gas de tea.

Planteamiento del problema

El gas de tea se encuentra geográficamente distribuido en los campos de producción de petróleo y gas. Cada campo de producción representa un nodo, el cual se conecta con otros nodos por medio de rutas de transporte terrestre, considerando la mayoría como vías terciarias. De manera tal, que se tiene un grafo campo – ruta de transporte – campo. Esta red permite la ubicación y relocalización de las tecnologías móviles (microturbinas, mini GTL). El volumen quemado en función del tiempo para cada campo es conocido, así como su caracterización. El gas que se contempla para aprovechamiento es el gas remanente de las teas, el cual tiene un comportamiento dinámico y difiere al gas de los pozos. El 99% del gas de tea en Colombia está asociado a pozos de producción de crudo (Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR), n.d.). La operación de los pozos petroleros en su naturaleza es intermitente por operaciones de mantenimiento, por decisiones operativas de incrementar o disminuir producción entre otras, lo que causaría disminución en la quema de gas, es por ello que se consideró que las tecnologías podrán ser trasladadas cuando sea requerida en otra tea.

Diseñar la cadena de suministro para la monetización del gas de tea implicó decisiones estratégicas como la selección del tamaño de las plantas móviles en términos de capacidad, costos y su asignación/relocalización a los campos de producción de crudo. La logística de transporte es otro nivel de decisión, en el cual la ruta de transporte de mínimo costo debe ser usada y finalmente decisiones operativas asociadas a obtener el máximo rendimiento del producto de interés (electricidad y/o combustibles medios). Estas decisiones se tomaron espacial y temporalmente, permitiendo el diseño de la cadena de suministro, buscando maximizar el valor presente neto, valorizando el gas de tea (Deloitte, 2020).

Para monetizar el gas quemado en tea se consideró que la mayor proporción de este gas proviene de los procesos de perforación y refinado de petróleo y una pequeña proporción de campos de gas natural, según los registros del Banco Mundial, y adicionalmente que este puede ser usado para producir electricidad o combustibles (diésel y gasolina).

Con base en los datos del flujo de gas disponible en cada tea, la producción esperada de combustibles líquidos mediante el proceso de aprovechamiento con GTL es considerablemente baja, alrededor de 130 BPD para el 80% del total de las teas, asumiendo que todo el gas de quema se transforma en combustibles líquidos, este volumen de combustibles no es técnica ni económicamente viable para trasladar por medio de poliductos.

En el caso de la energía eléctrica se conoce que el consumo energético de los campos de petróleo en Colombia oscila alrededor de los 700 MW/año (Sáchica, 2020), es decir es tan grande, que no se consideró la demanda como una restricción en el proceso. Es por ello que tanto para la energía como los combustibles se asume aprovechamiento o venta in situ.

En la Figura 1 se puede apreciar un diagrama interpretativo del diseño de cadena de suministro propuesta.

Se planteó el transporte de tecnologías entre las teas estaba definido por la capacidad de combustión generada y la capacidad de transformación de la tecnología considerada en la cadena de suministro. El cálculo de transporte se realizó considerando como medio de transporte tractocamiones con semirremolque de 3 ejes, para la localización/relocalización de las tecnologías móviles. En general, el problema de diseño de la cadena de suministro para el aprovechamiento

del gas de tea utilizando tecnologías móviles mini GTL y turbinas a pequeña escala se definió como:

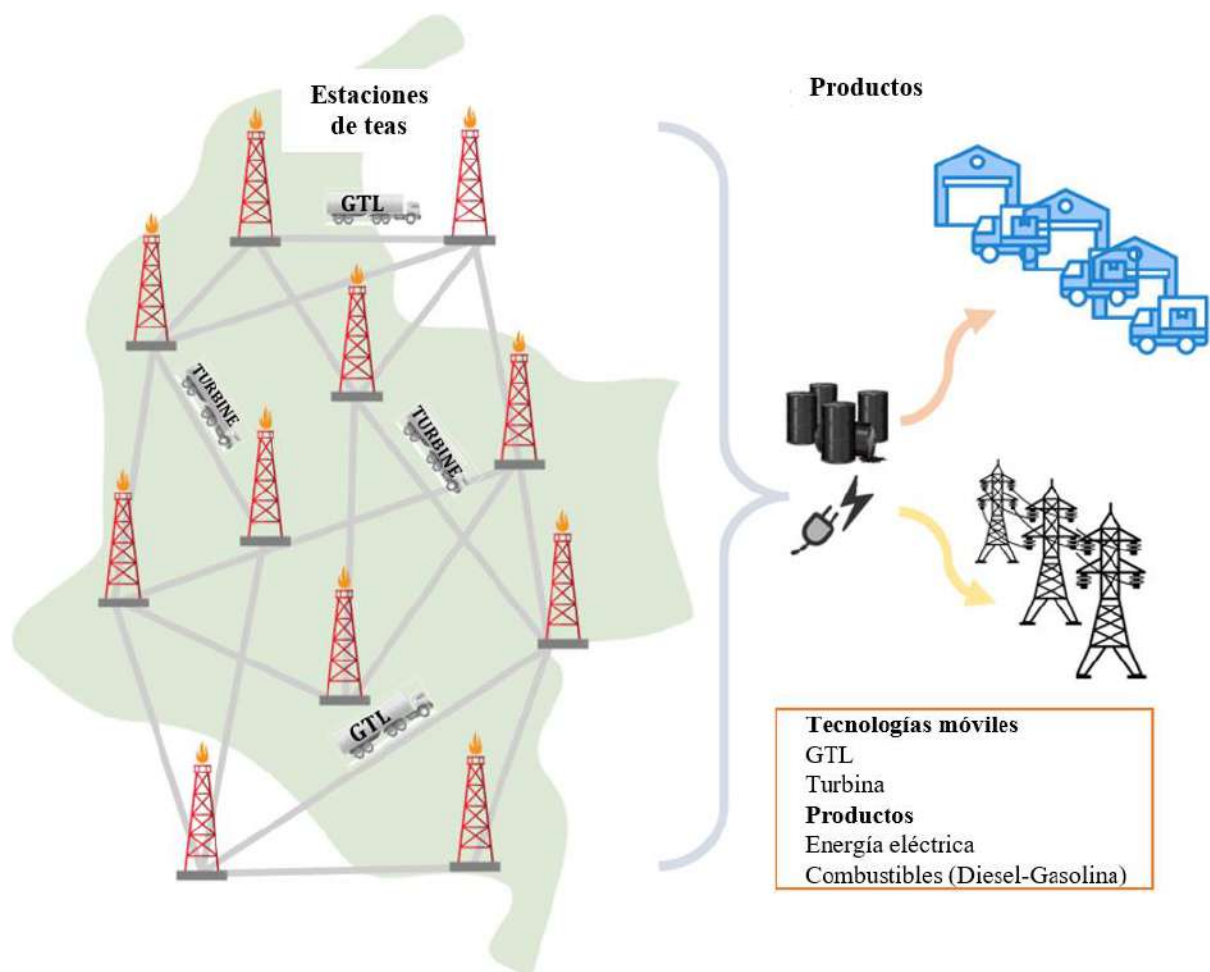


Figura 1. Cadena de suministro de tecnologías móviles para la quema en tea

- Distribución geográfica de las teas.
- Costos de producción de las materias primas.
- Logística de transporte (modos, capacidades, distancias, disponibilidad).
- Parámetros técnicos (rendimientos) y económicos (costos de capital y de explotación) en función de los tipos de materias primas y de la tecnología de producción.
- Incentivos públicos.

Las variables clave que deben optimizarse a lo largo del horizonte de planificación son:

- Volumen de gas quemado.
- Índices de producción de electricidad y combustibles
- Selección de tecnología, ubicación y escala de las instalaciones de producción de electricidad y combustibles.

La cadena de suministro para el uso de tecnologías móviles a pequeña escala se formuló como un modelo multiperiodo MILP, mono objetivo y espacialmente explícito. Se ha querido evaluar si existe una relación positiva entre la eficiencia operativa de las tecnologías GTL y turbinas móviles a pequeña escala y el aumento del Valor Presente Neto (VPN) del aprovechamiento de gas de tea en el contexto de una cadena de suministro diseñada y optimizada enfrentando restricciones logísticas, operativas y económicas.

Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar y optimizar una cadena de suministro integral que posibilite la evaluación del aprovechamiento de alternativas tecnológicas como el Gas a Líquidos (GTL) y turbinas, con el propósito de valorizar los gases de quema maximizando la eficiencia económica y reduciendo la contaminación del sistema.

2.2 Objetivos Específicos

Realizar un análisis exhaustivo del estudio técnico y económico relacionado con la búsqueda de información sobre ubicación, flujo de gas y número de teas, así como de las tecnologías de aprovechamiento disponibles en el mercado, con el fin de identificar la viabilidad operativa, económica y logística para la implementación de un proyecto de distribución de gas en la región seleccionada

Identificar y analizar los incentivos legales disponibles a nivel nacional que puedan contribuir a la reducción de costos o generar ahorros en proyectos de mitigación de gases de quema, con el propósito de maximizar el Valor Presente Neto del proyecto.

Desarrollar un modelo Mixto Entero Lineal que permita la asignación dinámica y optima de tecnologías modulares a pequeña escala para valorizar los gases de tea.

Metodología

Para evaluar el aprovechamiento de gas de tea mediante tecnologías mini GTL y Turbina, se distribuyó la metodología en 4 etapas como se muestra en la Figura 2. La primera etapa corresponde a la estimación de datos para la construcción del caso base de la cadena de suministro para el aprovechamiento de gas de tea. Primeramente, se hizo un barrido de información sobre las fuentes de gas disponibles en Colombia el número de teas, volumen de gas quemado, distancia entre teas. Posteriormente se realizó un estado de arte de las tecnologías mini GTL y Turbina que se encontraban disponibles en el mercado, se recopiló información técnica y económica sobre las mismas que permitieron establecer las condiciones del modelo. Para la segunda etapa se realizó un estudio sobre la legislación acerca de los proyectos que se implementaría como un estímulo dentro del módulo económico. En la tercera etapa se desarrolló el modelo de optimización lo cual consiste principalmente en definir el sistema: variables, suposiciones, parámetros, escala temporal y espacial. Después de ello se procede con la formulación matemática e implementación del código, debido a la complejidad del modelo de optimización, fue necesario diseñar una estrategia de descomposición heurística que permitiera reducir los tiempos de convergencia y simultáneamente mejorar las soluciones que se obtienen con el modelo original.

Por último, se realizó la evaluación de incertidumbre asociada a los parámetros con mayor influencia económica los cuales se consideraron son el valor de salvamento, *SVALUE*, el impuesto al carbono, *CARBONTAX*, los factores de variación del capex y opex, *Fcapex*, *Fopex*, los beneficios tributarios, *TAXBENEFITS* y los precios de los productos *PriceGTL*, *Prcieturbina*, mediante un análisis de sensibilidad global

usando índices de sensibilidad de Sobol ya que esta herramienta permite la evaluación parámetro a parámetro e interacción entre ellos, lo cual da como resultado una medida de la influencia de los parámetros de entrada en la variación global de salida.



Figura 2. Etapas de desarrollo metodología

Definición del problema

En esta sección, se presenta un modelo de optimización determinística para el diseño y planificación estratégica de cadenas de suministro para la monetización de gas de tea utilizando tecnologías móviles de pequeña escala. El modelo propuesto está definido por balances de materiales, restricciones de producción y demanda, restricciones logísticas, restricciones tecnológicas, y restricciones económicas. La formulación matemática y las características del modelo se discuten en detalle en las siguientes secciones.

3.1 Función objetivo

La función objetivo del modelo es la maximización del valor presente neto (NPV), sujeto a restricciones operativas y logísticas. El NPV , se expresa como la sumatoria en función del periodo de evaluación t , del flujo de caja $(CASHFLOW_t)$, menos los costos de inversión

($CAPEX_t$), menos el costo del flujo de carbono que corresponde al cobro por emisiones de carbono ($CARBONCOST_t$), sobre la tasa de descuento γ como se muestra en la *Ecuación (1)*.

$$\max NVP = \sum_t \frac{CASHFLOW_t - CAPEX_t - CARBONCOST_t}{(1 + \gamma)^{t-1}} \quad (1)$$

El $CASHFLOW_t$ se define como los beneficios antes de impuestos ($PROFIT_t$), más la depreciación ($DEP_{t',t}$), más los beneficios tributarios ($TAXBENEFITS_t$), y menos los impuestos ($TAXES_t$), en cada periodo de tiempo t , cómo se describe en la *Ecuación (2)*. Nótese que la depreciación, $DEP_{t',t}$, se expresa como una función lineal de los costos capitales usando un factor de depreciación. Para el modelo se aplicó una depreciación acelerada en un término de 5 años, lo anterior no indica que después de 5 años el valor comercial de las tecnologías sea cero por lo que se debe tener en cuenta en el flujo de caja.

$$CASHFLOW_t = PROFIT_t + \sum_{t'} DEP_{t',t} + TAXBENEFITS_t - TAXES_t \quad (2)$$

Los costos capitales, $CAPEX_t$ para un periodo de tiempo t , se definen como el costo asociado a la compra de la tecnología, $PriceBuy_{p,c}$, según el tipo, p , y capacidad, c , multiplicada por la variable entera, $BUY_{i,p,c,t}$, la cual, relacionada el número de compras a realizar en cada tea, i , el tipo de tecnología requerido, p , la capacidad de la tecnología, c , como lo indica la *Ecuación (3)*.

$$CAPEX_t = Fcapex * (vat + 1) * \sum_{i,p,c} PriceBuy_{p,c} * BUY_{i,p,c,t} \quad \forall t \quad (3)$$

Donde vat , corresponde al impuesto de valor agregado, aplicado cada que se realiza una compra y $Fcapex$, es un factor que se usará para estudiar el impacto de los costos operativos en la economía de la cadena de suministro, para el caso base su valor será de 1, durante el análisis de sensibilidad global variará en un rango que se determina más adelante y de esa forma se modifica los costos capitales totales $CAPEX$. de la misma forma actúa el $fopex$ que se presenta en la *Ecuación (11)*.

Para determinar el costo de emisión de carbono, $CARBONCOST_t$, se debe multiplicar el flujo de gas de tea que se penalizo, $GASPENALTY_t$, por el contenido de CO₂ por pie cúbico de gas, $EFactor_t$, luego se multiplica este flujo de CO₂ por el valor del impuesto al carbono por kg emitido, $CarbonTax_t$, como se muestra a continuación en la *Ecuación (4)*.

$$\begin{aligned}
 CARBONCOST_t & \\
 &= \alpha \\
 &* \sum_i GASPENALTY_{i,t} * EFactor_t * CarbonTax_t \quad \forall t
 \end{aligned} \tag{4}$$

Donde α , es un factor para que las unidades del flujo de gas queden expresadas en trimestre.

Los beneficios asociados a la cadena de suministro, se calculan como los ingresos, $INCOME_t$, más el valor de salvamento de la venta de tecnologías al final del horizonte, $SVALUE_{t|t=T}$, menos los gastos operacionales, $OPEX_t$, y menos la depreciación, como se define en la *Ecuación (5)*.

$$PROFIT_t = \sum_i INCOME_{i,t} - \sum_{t'} DEP_{t',t} + SVALUE_{t|t=T} - OPEX_t \quad \forall t \tag{5}$$

Las *Ecuaciones (6) y(7)* explican la relación de los impuestos, $TAXES$, los cuales pueden ser positivos o iguales a cero, y estos se tienen en cuenta cuando las ganancias, $PROFIT_t$, por el respectivo impuesto de renta, tr , son positivas, de lo contrario los impuestos se asumen como cero para ese periodo. Para el caso de las ganancias se resta la depreciación, haciendo uso de un truco contable para disminuir pago de impuestos.

$$TAXES_t \geq PROFIT_t * tr \tag{6}$$

$$TAXES_t \geq 0 \quad (7)$$

3.2 Beneficios Tributarios

Los beneficios tributarios, $TAXBENEFITS$, corresponden a descuentos que otorga el gobierno colombiano sobre el valor de la inversión, en este caso, debido a la naturaleza ambiental del proyecto. Estos se calculan como se muestra en la *Ecuación (8)*, mediante el producto de los gastos capitales, $CAPEX_t$, por el beneficio otorgado, tb , el cual se describe como un porcentaje o fracción del CAPEX. Adicionalmente en la *Ecuación (9)*, se considera que estos beneficios tributarios solo pueden ser aplicados cuando no superan el valor de los impuestos, $TAXES_t$.

$$TAXBENEFITS \leq tb * \sum_t CAPEX_t \quad (8)$$

$$TAXBENEFITS_t \leq TAXES_t \quad \forall t \quad (9)$$

3.3 Depreciación acelerada

La depreciación en el impuesto sobre la renta se considera como la pérdida de valor de los activos tangibles utilizados en las actividades productoras de renta, en consideración a la vida útil de los activos productores de renta. Para efectos fiscales o como beneficio, se cuenta con la depreciación acelerada, que consiste en aumentar la tasa de depreciación, es decir, considerar una mayor depreciación en menor tiempo, para reducir los costos fiscales. En este caso como se muestra en la *Ecuación (10)*, la depreciación se calcula tomando en cuenta el factor de depreciación $adepf_{t,t'}$, factor que se activa cuando hay un gasto capital, y es vigente durante cinco años posterior a cada compra, multiplicado por el costo de la inversión $CAPEX_t$, ambas variables dependientes del periodo de tiempo.

$$ADEP_{t,t'} = adepf_{t,t'} * CAPEX_t \quad \forall t, t' \quad (10)$$

3.4 Costos Operativos

Los costos operativos, $OPEX_t$, se calculan como la suma de los costos de procesamiento PC_t , y los costos de relocalización de las plantas RC_t , estos últimos están asociados a la puesta en marcha en cada tea y el transporte de las tecnologías entre teas como se muestra en la *Ecuación* (11).

$$OPEX_t = Fopex * (PC_t + RC_t) \quad \forall t \quad (11)$$

Donde $Fopex$, es un factor que se usará para estudiar el impacto de los costos operativos en la economía de la cadena de suministro dentro de la etapa de análisis de sensibilidad global.

3.5 Costos de Producción

Los de proceso, PC_t , corresponden a los costos necesarios para que la planta opere en el sitio, como energía consumida, operador, mantenimiento, entre otros. El flujo de productos, $PRODUCTS_{i,p,t}$, depende del tipo de tecnología, p , capacidad, c y periodo t , y está asociado con un parámetro de costo fijo de producción, $CostP_{p,c}$, que también depende de la tecnología y la capacidad. Esta expresión se encuentra en la *Ecuación* (12). Como se menciona anteriormente $alpha$, es un factor utilizado para obtener las unidades de medida de tiempo en trimestres.

$$PC_t = alpha * \sum_{i,p,c} CostP_{p,c} * PRODUCTS_{i,p,t} \quad \forall t \quad (12)$$

3.6 Costos de Relocalización

Cada vez que se traslada una planta de un sitio a otro, debe montarse, desmontarse y transportarse. Los costos de relocalización incluyen, el costo de puesta en marcha, $setupc_{p,c}$, el costo de desarmar la planta, $dissamblec_{p,c}$, y el costo de transportar la planta, $tcost_{i,i'}$, como se muestra en la *Ecuación* (13).

$$RC_t = \sum_{i,i',p,c} (setupc_{p,c} + dissamblec_{p,c} + tcost_{i,i'}) * M_{i,i',p,c,t} \forall t \quad (13)$$

Donde la variable entera, $M_{i,i',p,c,t}$ indica si una planta, p , de capacidad c , se trasladó de la tea i a la tea i' en el periodo, t .

3.7 Ingresos

Los ingresos, $INCOME_{i,t}$, se definen como el beneficio debido a la venta de los productos obtenidos, $PRODUCTS_{i,p,t}$ por el precio en el mercado de estos, $Price_{p,t}$, cómo se observa en la Ecuación (14).

$$INCOME_{i,t} = alpha * \sum_p (Price_{p,t} * PRODUCTS_{i,p,t}) \quad \forall i, t \quad (14)$$

3.8 Valor de Salvamento

En la Ecuación (15), se calcula el valor de salvamento, $SVALUE$, corresponde a las ganancias por la venta de las tecnologías al final del horizonte de planificación considerando la depreciación. La depreciación, se considera como un valor fijo, sv , al final de planificación horizonte.

$$SVALUE = \sum_{i,p,c,t=T} PLANT_{i,p,c,t} * PriceBuy_{p,c} * sv \quad (15)$$

3.9 Logística de plantas modulares

La variable entera, $PLANT_{i,p,c,t}$, que se muestra en la Ecuación (16), se refiere a si hay una o más plantas p , de capacidad c , disponible en la tea i , durante el periodo t . La disponibilidad de la planta se calcula como el balance entre las plantas del periodo anterior, $PLANT_{i,p,c,t-1}$, más la disponibilidad inicial, $plantinit_{i,p,c,t=1}$, que es un parámetro que depende de si la empresa cuenta con plantas antes de iniciar el proyecto, si se compra una planta, $BUY_{i,p,c,t-1}$, si llega una

planta, $\sum_{i'} M_{i',i,p,c,t-1}$, o salió una planta de otra tea, $\sum_{i'} M_{i,i',p,c,t}$. Cabe señalar que todas las variables mencionadas son variables enteras.

$$\begin{aligned}
 PLANT_{i,p,c,t} = & PLANT_{i,p,c,t-1} + plantinit_{i,p,c,t=1} + \sum_{i'} M_{i',i,p,c,t-1} \\
 & + BUY_{i,p,c,t-1} - \sum_{i'} M_{i,i',p,c,t} \quad \forall i, p, c, t
 \end{aligned} \tag{16}$$

3.10 Balance de masa

El balance de masa se realiza en una tea y en función de los diferentes caudales de gas que intervienen en el proceso. El gas en una tea, $gastea_{i,t}$, es igual al flujo total de gas que se procesa, $TGASFLOW_{i,t}$, más el gas que no pudo ser tratado con la tecnología y tuvo que ser quemado, $FLARING_{i,t}$. Esto se muestra en la *Ecuación (17)*.

$$gastea_{i,t} = TGASFLOW_{i,t} + FLARING_{i,t} \quad \forall i, t \tag{17}$$

Como se mencionó en el planteamiento del problema, el procesamiento del gas o la quema se realiza en el sitio, según corresponda.

La *Ecuación (18)*, considera que el objetivo de reducción de quema de gas se hará de manera gradual con base en un target, $target_t$, por lo que cualquier actividad de quema por encima de este objetivo resulta en sanciones económicas, esto con base en regulaciones que se han implementado en Dakota de Norte en Estados Unidos (North Dakota Commission, 2014). De acuerdo a esto, el gas de tea, $FLARING_{i,t}$ corresponde a la suma del gas penalizado, $GASPENALTY_{i,t}$, más el gas no penalizado, $GASNOPENALTY_{i,t}$.

$$FLARING_{i,t} = GASPENALTY_{i,t} + GASNOPENALTY_{i,t} \quad \forall i, t \tag{18}$$

Adicionalmente el gas no penalizado, $GASNOPENALTY_{i,t}$, debe ser menor o igual al objetivo de reducción, $target_t$ por el gas total disponible en el campo, como se muestra en la *Ecuación (19)*.

$$\sum_i GASNOPENALTY_{i,t} \leq target_t * \sum_i gastea_{i,t} \quad (19)$$

El $GASPENALTY_{i,t}$ es adicionado como un costo en la función objetivo.

3.11 Gas disponible para procesamiento

El gas disponible, $TGASFLOW_{i,t}$, se envía a una planta disponible en sitio para su transformación en otros productos de mayor valor agregado. Este gas puede ser procesado en la tea i , mediante una planta p , con capacidad c , en el periodo t , lo cual se tiene en cuenta mediante la variable $PROCESSED_{i,p,c,t}$, como se muestra en la *Ecuación (20)*.

$$TGASFLOW_{i,t} = \sum_{p,c} PROCESSED_{i,p,c,t} \quad \forall i, t \quad (20)$$

3.12 Productos

La *Ecuación (21)* refleja los productos, $PRODUCTS_{i,p,t}$, los cuales se calculan con el parámetro de desempeño de cada tecnología, $yield_p$, el cual depende de la tecnología, por el gas tratado por cada tecnología, $PROCESSED_{i,p,c,t}$, por la composición del metano, $comp$, que es el compuesto principal del gas natural y el compuesto que se transforma en los nuevos productos.

$$PRODUCTS_{i,p,t} = \sum_c yield_p * PROCESSED_{i,p,c,t} * comp \quad \forall i, p, t \quad (21)$$

3.13 Restricciones del modelo matemático

3.13.1 Restricciones de capacidad

La capacidad total de procesamiento disponible en el sitio, $CAPACITY_{i,p,c,t}$, se estima como la capacidad de una planta modular, $capmax_{p,c}$, por el número de plantas disponibles, $PLANT_{i,p,c,t}$, como se describe en la *Ecuación (22)*.

$$CAPACITY_{i,p,c,t} = capmax_{p,c} * PLANT_{i,p,c,t} \quad \forall i, p, c, t \quad (22)$$

La *Ecuación (23)* asegura que el gas que se procesa, $PROCESSED_{i,p,c,t}$ sea menor o igual a la capacidad de la tecnología, $CAPACITY_{i,p,c,t}$.

$$PROCESSED_{i,p,c,t} \leq CAPACITY_{i,p,c,t} \quad \forall i, p, c, t \quad (23)$$

Además, se debe asegurar que el gas a tratar supera la capacidad mínima de las tecnologías, como se muestra en la *Ecuación (24)*.

$$PROCESSED_{i,p,c,t} \geq mincap_p * CAPACITY_{i,p,c,t} \quad \forall i, p, c, t \quad (24)$$

La capacidad mínima de las plantas, $mincap_p$, se considera como el 30% de la capacidad total de la planta.

3.13.2 Restricciones de disponibilidad

La *Ecuación (25)* restringe el número máximo de tecnologías, p , que puede haber en una tea, i , en determinado periodo de tiempo, t .

$$\sum_{p,c} PLANT_{i,p,c,t} \leq MaxPlants \quad \forall i, t \quad (25)$$

Finalmente, la *Ecuación(26)*, considera un límite máximo de compra de plantas en cada periodo de tiempo, impuesto por el parámetro $MaxPlants$.

$$\sum_{i,p,c} BUY_{i,p,c,t} \leq MaxBuyPlants \quad (26)$$

3.13.3 Restricciones de relocalización

La *Ecuación (27)* considera que una relocalización de una planta se puede llevar a cabo solo si la planta está disponible.

$$PLANT_{i,p,c,t} \geq \sum_{i'} M_{i,i',p,c,t} \quad \forall i, p, c, t \quad (27)$$

Y la *Ecuación* (28), permite al modelo tomar la decisión de mover una planta, asegurando que sea entre dos teas diferentes. Se satisface por $i = i'$

$$M_{i,i',p,c,t} = 0 \quad \forall i = i', p, c, t \quad (28)$$

3.14 Estimación Potencial de descarbonización

Se define como descarbonización al proceso de reducción de emisión de gases de efecto invernadero, principalmente de CO₂. (Iberdrola, n.d.)

El proceso actual de extracción de petróleo da lugar a procesos de emisión conocidos como quema en tea. Como se mencionó anteriormente, este gas es rico en metano, y podría utilizarse para producir más combustible para venta o producir energía para ser usada en el mismo proceso de extracción. Por lo tanto, queremos averiguar qué impacto tiene la transformación de este gas a través de tecnologías móviles (GTL, Turbina), en la descarbonización.

En la *Ecuación* (29), se realiza el cálculo de las emisiones de CO₂ del sistema de aprovechamiento de gas de tea que corresponden a comparar el volumen de gas procesado $GASPROCESSED_{i,p,c,t}$, por el factor de emisión según la tecnología utilizada para procesar, $Efactor_p$, más las emisiones producidas por la quema del gas que no se procesó, $FLARING_{i,p,c,t}$, en comparación con la *Ecuación* (30), que calcula las emisiones de los procesos de producción de energía convencionales, $Econv_p$, que sería la producción de energía eléctrica mediante la quema de diésel en caso de las turbinas, y la producción de combustibles en refinería.

$$EmissionsCO_{2p,t} = \sum_{i,c} (GASPROCESSED_{i,p,c,t} * Efactor_p) + FLARING_{i,p,c,t} \quad \forall p, t \quad (29)$$

$$EmissionsConvCO_{2p,t} = \sum_{i,c} (GASPROCESSEDi_{p,c,t} * Econvp_p) \forall p, t \quad (30)$$

El marco de optimización propuesto anteriormente aborda el diseño estratégico a largo plazo de una cadena de suministro de aprovechamiento de gas de tea a nivel nacional. El modelo propuesto se basa en un componente económico, las *Ecuaciones (1) a (15)*, que es común a otras metodologías presentadas para diferentes sistemas. Sin embargo, existen importantes consideraciones particularmente relevantes para el diseño de cadenas de suministro de aprovechamiento de gas de tea que merece la pena destacar. Una de ellas es la asignación de la tecnología más favorable para aprovechar el gas y obtener con ello un mayor beneficio económico, modelizado mediante la *Ecuaciones (16) a (28)*. La reducción de las emisiones que se puede calcular mediante las *Ecuaciones (29) y (30)*, esto se considera otro aspecto importante para la motivación del diseño de la cadena de suministro pues evidencia el potencial no solo económico sino ambiental de la estrategia.

Por último, deben considerarse los costes relacionados con la compra de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de gas de tea y los costes de procesamiento que incluye el transporte de tecnologías hasta los puntos de emisión de gas. Para ello se utilizan la *Ecuación (3)* que se incluye para calcular las inversiones de capital en la compra de las tecnologías principalmente, y las *Ecuaciones (11) a (13)* que se incluyen para contabilizar los costes operativos asociados.

Todos los nombres de las variables y sus descripciones se pueden encontrar en el Apéndice A.

Caso De Estudio

En esta sección, se analiza la aplicabilidad del modelo de optimización propuesto en un escenario colombiano. El modelo de optimización requiere información técnica y económica sobre la ubicación de las teas, las tecnologías de procesamiento y el transporte. Este caso de estudio considera un horizonte temporal de 10 años, de 2012 a 2022, dividido en 40 periodos de 3 meses cada uno. En total, el estudio incluye 35 teas (

Tabla 4), dos tecnologías de procesamiento (mini GTL y microturbina) y 3 capacidades para cada tecnología (pequeña, mediana, grande), ver Tabla 3. La década fue seleccionada teniendo en cuenta que para estas fechas existen reportes del banco mundial acerca de la ubicación y flujo de gas de quema en tea en Colombia.

Los procesos de combustión generan emisiones que contienen principalmente CO₂, carbono negro y otros componentes que contribuyen al cambio climático. En los niveles actuales, la quema en tea en todo el mundo produce anualmente unos 400 millones de toneladas de emisiones equivalentes de CO₂. (Banco Mundial, s.f.)

En el caso de Colombia, Ecopetrol, al ser la empresa petrolera más grande del país, es la más interesada en sacar provecho de la quema en tea, razón por la cual en 2010, Ecopetrol lanzó su actual estrategia de cambio climático, que incluye el monitoreo y reporte de emisiones de Gases de Efecto Invernadero, la reducción de emisiones de las operaciones y la cadena de suministro de la empresa, la participación en actividades de investigación y desarrollo, y la contribución a la política climática nacional. Adicionalmente, en 2020, Ecopetrol se unió a la iniciativa del Banco Mundial de Cero Quema Rutinaria para 2030. Cabe destacar que el país también participa en la

Iniciativa Global de Metano desde 2004 y en la Coalición Clima y Aire Limpio desde 2012. (Ecopetrol, 2020).

Actualmente, Colombia ha logrado disminuir el volumen de gas de tea en casi un 70%, pasando de 1 billón de metros cúbicos (bcm) en 2012 a 0.3 bcm en 2021 como se muestra en la Figura 3. A pesar de esto, el volumen de gas de tea en los últimos años sigue representando un alto valor monetario, aproximadamente 30 millones de dólares y un aporte de CO₂ de 600 mil toneladas. Calculo con base en datos reportados por (Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR), n.d.).

El objetivo sigue siendo llevar estas reducciones a cero en el año 2050, por todo lo que ello implica no sólo en términos de contaminación sino también de gasto de combustible y energía. Por lo tanto, se quiere analizar si es posible que mediante el desarrollo de una cadena de suministro basada en las nuevas alternativas móviles de mini gas a líquido y microturbinas como alternativa para utilizar estos gases quemados, sea posible monetizar estas fuentes de manera económica y ambientalmente sostenible.

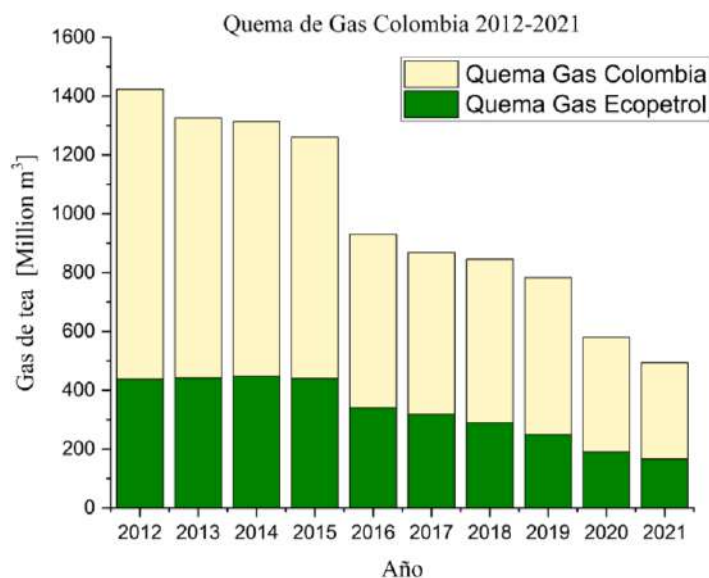


Figura 3. Flujo de gas de tea en Colombia 2012-2021

Datos: tomados de la página del Banco Mundial

4.1 Tecnologías de conversión

En este trabajo, la conversión de gas a líquido (GTL) y la tecnología de turbinas se seleccionaron como las principales vías para el aprovechamiento del gas de combustión. Debido a las políticas de mitigación de gases, muchas empresas han desarrollado este tipo de tecnologías a escala modular y móvil, por lo tanto, para la selección de las tecnologías más convenientes para el desarrollo de la investigación, se consideró el volumen de gas disponible, así como la disponibilidad de información operativa de las diferentes opciones.

La tecnología GTL es muy estudiada porque los productos obtenidos son combustibles líquidos, que tienen mayor valor económico en el mercado, son considerados de alta calidad por su baja concentración de azufre y alto potencial y son más fáciles de transportar que el gas natural. (Wood et al., 2012)

Las turbinas, además de generar energía para abastecer el coste energético de las operaciones, pueden acoplarse a otros sistemas de producción como sistemas de almacenamiento de datos, además de esto, se consideran de bajo coste y fácil aplicación.

Se consideraron opciones modulares para ambas tecnologías porque facilitan su desplazamiento debido a que las fuentes son intermitentes y de bajo volumen de emisión (1-5 MMSCF). La fácil movilidad de las plantas modulares permite aprovechar tiempos de inactividad de la producción, y que la tecnología se desplace a otra fuente o se establezca durante todo el horizonte, si así lo considera el modelo.

Solo se consideró metano como combustible principal del gas de tea ya que otros compuestos carburantes que pueden estar presentes, como etano, butano, propano entre otros tienen una participación inferior al 10% en la composición total del gas,(Velez Diez, 2021) que varía según la naturaleza del pozo, las condiciones de extracción, la ubicación entre otras, por lo que para tener estimaciones más conservativas metano será el principal compuesto.

4.1.1 Tecnologías modulares Gas a Líquido (GTL)

El proceso de conversión de gas en combustibles líquidos ha experimentado muchos cambios desde su creación en la década de 1920. Las plantas de GTL a pequeña escala son especialmente útiles cuando la materia prima es limitada o escasa. La tecnología de conversión de gas en líquidos (GTL) puede producir combustibles líquidos de mayor valor y más fáciles de transportar al mercado que el gas natural (Vygon Consulting, 2021). Los productos GTL utilizan gas natural como materia prima, que es una fuente de energía baja en carbono. Por lo tanto, los

combustibles producidos a partir de GTL también son relativamente bajos en emisiones que los combustibles basados en petróleo crudo. (Tecnología Offshore, 2020)

El nivel de madurez de la tecnología GTL (Technology Readiness Level- TRL según el Instituto Americano de Petróleo-API) es el nivel 6, lo que significa cumple todos los requisitos de unidad de producción construida e integrada en el sistema operativo previsto; programa completo de pruebas de interfaz y funcionamiento en el entorno previsto (o simulado) y operado durante menos de tres años; en este nivel el equipo puede requerir apoyo adicional durante los primeros 12 a 18 meses. (Vygon Consulting, 2021)(Yasseri & Bahai, 2018)

En el 2012 cuando el Banco Mundial lanzó la iniciativa Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR), existían alrededor de 7 empresas desarrollando proyectos de plantas GTL a escalas modulares, durante el paso de los años, muchos de estos proyectos han sido cancelados por diferentes motivos entre económicos y técnicos, y del mismo modo otros han surgido. Anualmente el Banco Mundial realiza reportes sobre las empresas, sus proyectos e información técnica y económica de estos, en el último reporte del 30 de septiembre de 2022, 5 empresas fueron destacadas, se encuentran de primeras en la Tabla 1, aun así, se reportan 10 empresas que han desarrollado tecnologías a escala modular durante los últimos 10 años.

4.1.2 Turbinas modulares

Las microturbinas son pequeñas turbinas de combustión. Al igual que las turbinas de gas de mayor tamaño, pueden utilizarse en la generación de electricidad o en sistemas combinados de calor y electricidad (CHP).

Dependiendo del proveedor de tecnología, las turbinas pueden funcionar con diversos combustibles, como gas natural, gases ácidos (con alto contenido de H₂S), gases de bajo poder calorífico y combustibles líquidos como gasolina, queroseno y gasóleo/aceite de calefacción destilado, condensado de gas y aceite de pirólisis (Vygon Consulting, 2021).

Tabla 1. Empresas con tecnologías modulares GTL.

GTL	Compact GTL	1000 a 15000 barriles de crudo/diésel por día
	Emerging Fuels	Produce de 25-500 BPD.
	Gas Techno	Procesa entre 300-10.000MSCFD. Productos: metanol, etanol y formaldehido
	GreyRock	Procesa 500MSCFD
	Bluescape Clean Fuels	Produce: 100-5000BPD. Gasolina, Metanol o Syncrude
	Calvert Energy	100BPD Diesel, 1BPD Cera y 2BPD agua por MMSCFD
	Velocys	1400-5000BPD.
	Primus Green Energy	500-2000BPD. Gasolina o Metanol
	Verdis Fuels	500BPD. Metanol
	BGTL Fuels of change	20-200 BPD.Gasolina, Diesel, Jet fuel, Metanol, etanol, Cera, Di Metil Éter, Mezcla de alcoholes

*Mas información técnica en el apéndice B.

A diferencia de la tecnología GTL, las turbinas se pueden acoplar entre sí para satisfacer una necesidad mayor. Las turbinas tienen un TRL 7 (Technology Readiness Level- TRL según el Instituto Americano de Petróleo-API) (Vygon Consulting, 2021), que significa que el sistema de producción ha sido probado sobre el terreno, es decir la unidad de producción ha sido instalada y ha funcionado durante más de tres años con una fiabilidad aceptable, demostrando un bajo riesgo de fallos iniciales en el campo. (Yasseri & Bahai, 2018)

Al igual que el GTL, las turbinas se consideran tecnologías aplicables para la valorización y disminución del gas de tea, por lo que en estos mismos reportes del Banco Mundial existen

empresas que desarrollan turbinas a escala modular y que aprovechan este tipo de gas para producir energía, las empresas destacadas se muestran en la Tabla 2.

En cuanto a los parámetros de operación, en el caso de la tecnología GTL, el Banco Mundial define la tecnología como mini y móvil, si su capacidad máxima diaria es de 1 Millón De Pies Cúbicos Estándar (MMSCFD), por lo que ese es el tope para la capacidad de las plantas GTL modeladas.

Tabla 2. Empresas con turbinas modulares

Turbinas	Aggreko	10-36kW
	Apr Energy	20-500MW
	Capstone Turbine	50-1000kW
	Green Energy	200kW-2.5MW
	LPP Combustion LLC	30kW-300MW
	MESA Natural Gas Solutions LLC	70-400kW
	Moser Energy System	70-1000kW
	Opra Turbines	1-10MW
	Turboden- Mitsubishi Heavy Industries	200-20000kW
	Unicorn LTD and Green Recycling Technologies	200-500kW
	Wartsilla SG, LG and GD Flexible power plants	

*Mas información técnica en el apéndice B

En el caso de las turbinas, se decidió usar los diseños de Opra, debido a la disponibilidad de información técnica. En el caso de las turbinas Opra, el tamaño mínimo de estas turbinas es de 1MMSCF y el máximo de 10 MMSCF, por lo tanto, estos serán los límites para las capacidades seleccionadas. (Global Gas Flaring Reduction Partnership, 2022).

Según (Tan & Barton, 2015), debido a la escasa información sobre los costes operativos, especialmente los de arranque y parada, estos pueden estimarse como el 1% de los costes de capital de la planta (H. Carl Bauman, n.d.). Nótese que este porcentaje puede sensibilizarse para analizar su efecto en los costos de la cadena de suministro.

4.2 Costos capitales

Debido a que este tipo de información es reservada por las empresas por temas de competitividad, y es inusual, encontrar el costo exacto de las tecnologías, se dedujeron los costos de capital mediante relaciones encontradas en la literatura.

En el caso de las plantas GTL, (Tan & Barton, 2015) realizaron a partir de datos bibliográficos una regresión logarítmica que permite estimar el costo de la planta según los barriles de productos diarios obtenidos. Los resultados se muestran en la Figura 4.

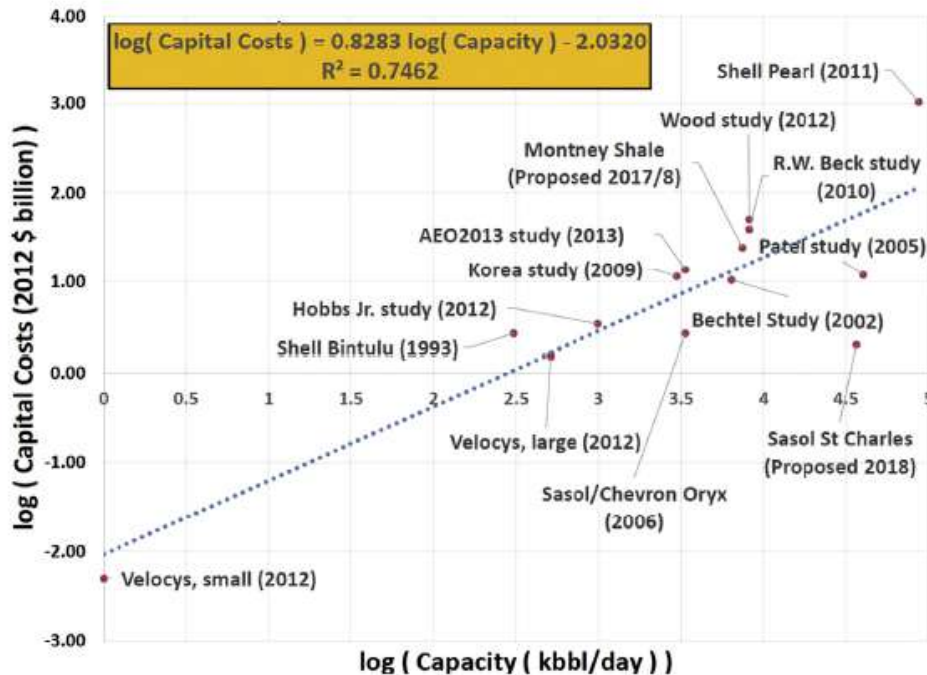


Figura 4. Regresión logarítmica para estimar precios plantas GTL

Nota: Tomada de Barton et al 2015

En el caso de las turbinas, (Mikheev & Potanina, 2019a) estimaron los costos para tres tipos de turbinas según su capacidad de generación eléctrica, como se observa en la Figura 5. Para el modelo se considera que las turbinas utilizadas serán turbinas de gas simple (GT-S) por lo que las estimaciones de costos de capital son basadas en estos datos.

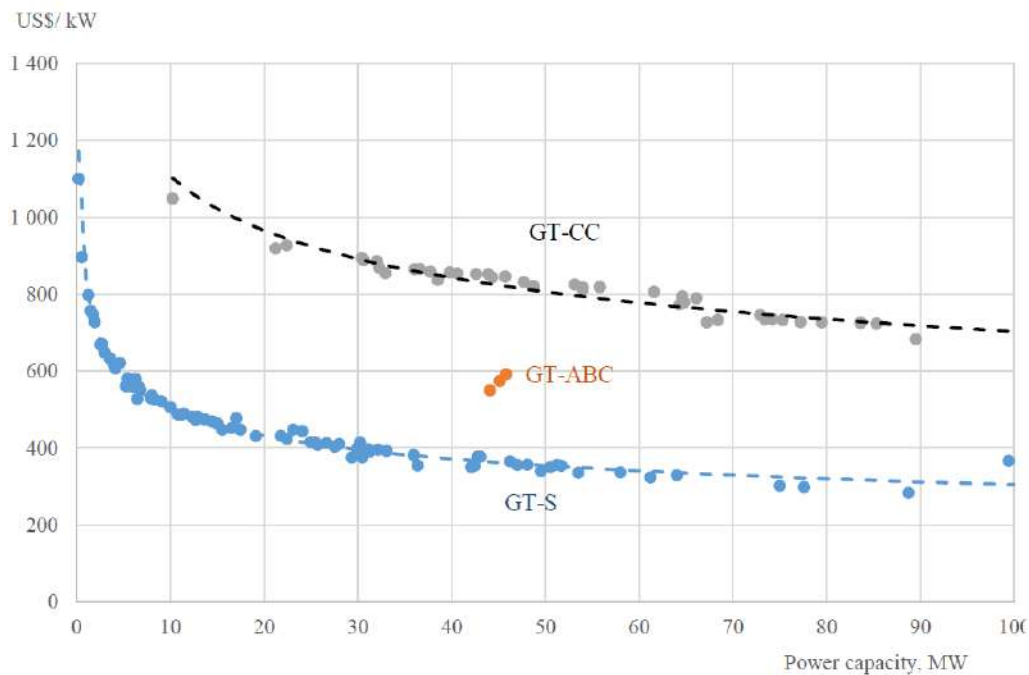


Figura 5. Estimación costos de capital turbinas

Nota: Imagen tomada de (Mikheev & Potanina, 2019b)

Las características de las tecnologías utilizadas en el modelo se reflejan en la Tabla 3.

4.3 Rendimiento de las tecnologías

- El Banco Mundial reporta para las tecnologías GTL un rendimiento de aproximadamente 100 BPD de combustibles líquidos por cada 1MMSCFD.

- En el caso de las turbinas, un reporte de la empresa OPRA, en la cual se considera una turbina con una eficiencia de 60%, calculan el rendimiento de la turbina en un valor de 180950 kWh/MMSCF

Tabla 3. Características de las tecnologías utilizadas en el modelo

		Unidades	Pequeña	Mediana	Grande
Turbina	Capacidad Max	MMSCF MES	4	20	40
	Salida	MW	1	5	10
	Costo capital	Millón USD	0.636	3.180	6.360
GTL	Capacidad Max	MMSCF MES	3	15	30
	Salida	BBL/día	10	50	100
	Costo capital	Millón USD	5.7	9.5	17
			Para ambas tecnologías		
	Costos puesta marcha		1% de costos capitales		
	Costos desarme		1% de costos capitales		

4.4 Infraestructura de transporte

En el caso estudiado, las tecnologías modulares se desarrollan en contenedores que van desde los 12 pies hasta los 40 pies de longitud, dependiendo de la capacidad de cada tecnología. Según la normativa del Ministerio de Transporte, este tipo de carga debe transportarse en semirremolques de dos o tres ejes. Para este caso se seleccionó el semirremolque de tres ejes como medio de transporte.

Los costos de transporte se dividen en fijos y variables. Los costes fijos están asociados al mantenimiento y reparación de los vehículos, y los variables dependen de la distancia, el combustible utilizado y los peajes. Los datos de costos de transporte de los contenedores se pueden estimar utilizando la herramienta interactiva SiceTac del Ministerio de Transporte (Ministerio de Transporte, n.d.-a), pero dado que la mayoría de las carreteras que conectan las chimeneas son

carreteras terciarias y la herramienta está diseñada para carreteras principales, se realizó una proyección de costos calculando diferentes trayectos y utilizando después los costos resultantes para encontrar una ecuación que reflejara el comportamiento del coste en función de la distancia,

Figura 6.

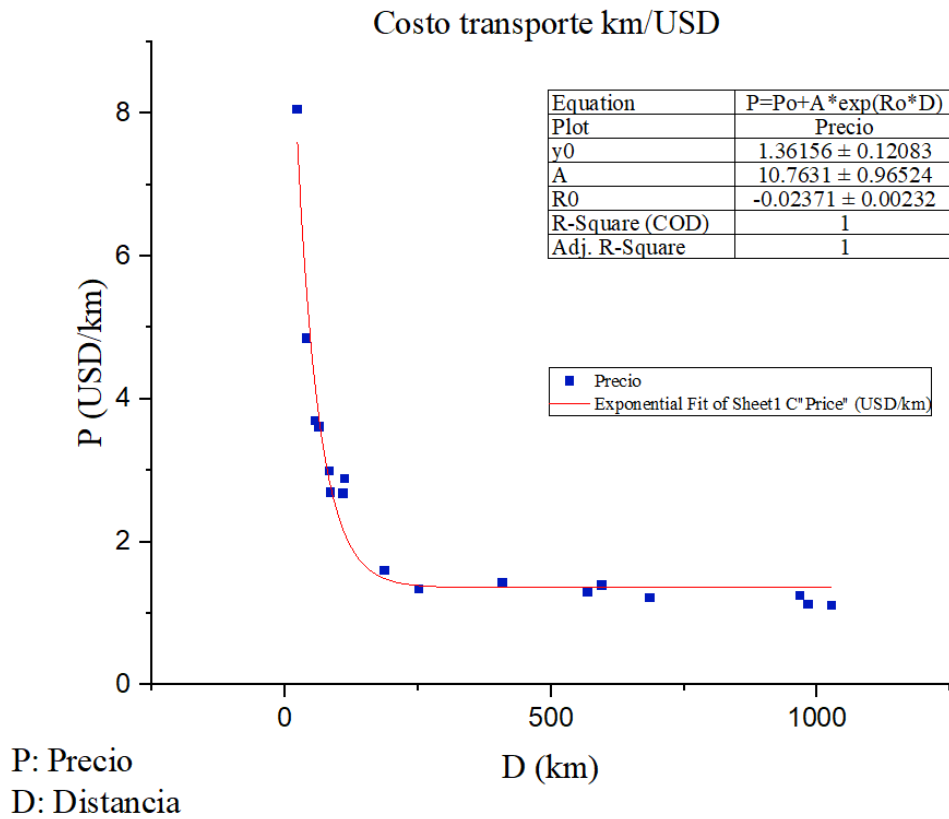


Figura 6. Estimación costo del transporte de las tecnologías móviles de una tea hacia otra

La estimación de las distancias entre las diferentes chimeneas se realizó a través del software ArcGIS (Esri, n.d.), localizando las chimeneas en el mapa, y uniendo capas que contienen carreteras principales, carreteras secundarias, rotondas e intercepciones.

Como puede verse en la

Figura 7, no todas las teas se encuentran en zonas cercanas, y para que el costo de transporte, la distancia y el tiempo fueran posibles, las teas se conectaron entre sí con una distancia máxima entre ellas de aproximadamente 500 kilómetros.

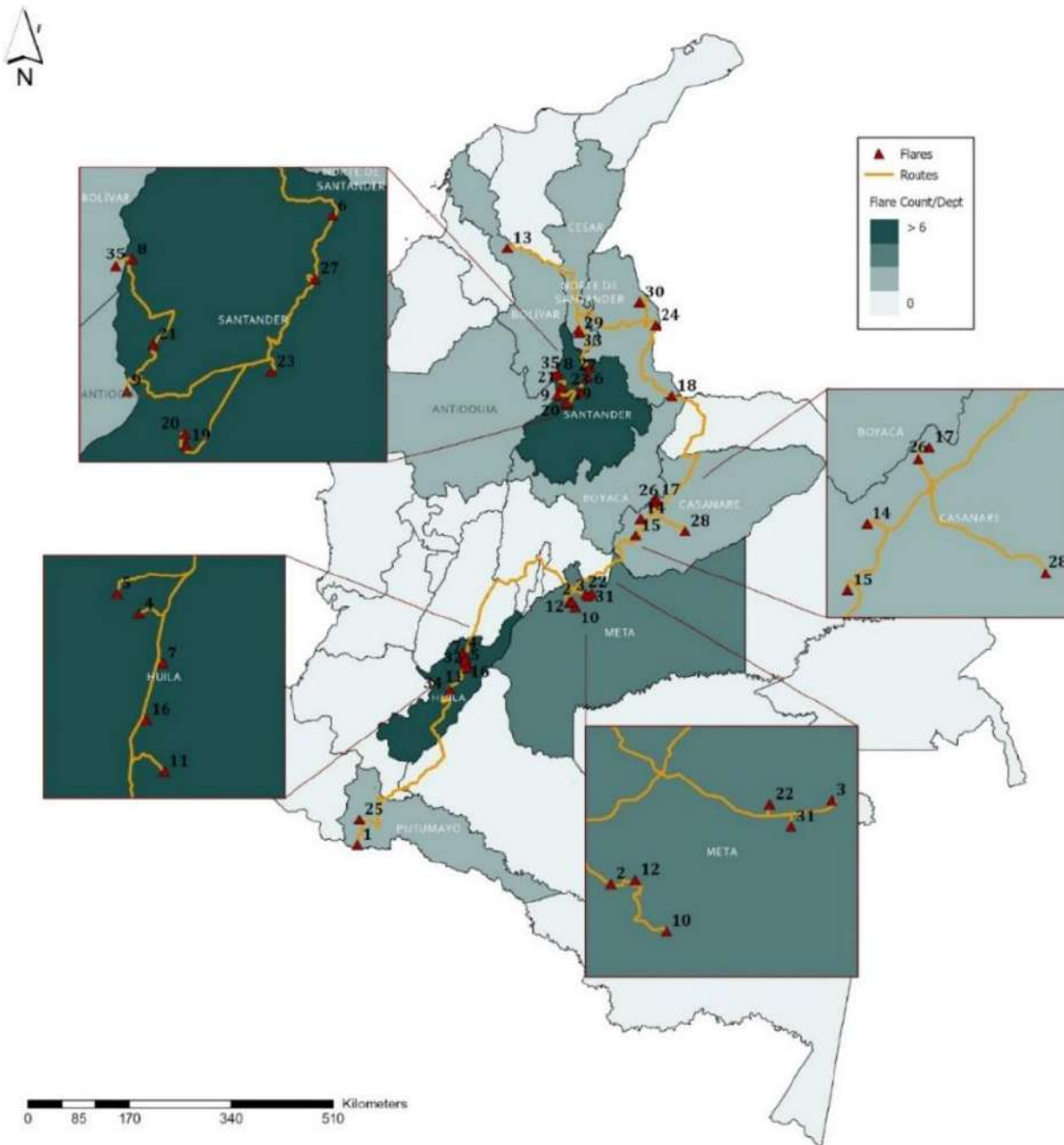


Figura 7. Mapa ubicación de las teas en Colombia

Este mapa fue creado usando el software ArcGIS by Esri. ArcGIS® es propiedad intelectual de Esri y su uso debe realizarse bajo licencia. Copyright © Esri. Todos los derechos reservados. Para mayor información acerca del software de Esri®, visitar www.esri.com.

El modelo considera que, si la planta se compra en el periodo 1, estará disponible hasta el siguiente periodo para operar, es decir se cuenta con un periodo para compra, transporte e instalación de las plantas de una tea a otra, este lapso de tiempo es igual para el caso que el modelo decide trasladar una tecnología de una tea a otra.

4.5 Precio de los productos

4.5.1 Combustibles Líquidos

Para el caso de los productos obtenidos por la tecnología Gas a líquidos (GTL), se asume una producción de Diésel y Gasolina, en una proporción de 80-20, lo cual quiere decir que el 80% de los barriles producidos serán de Gasolina y el 20% serán de Diesel. (Stanley Tooohukwu et al., 2019). Para el precio de los combustibles se tomó el reporte realizado por la Administración de Información de la energía (EIA), se tomó el valor reportado para el área de atlántica baja (PADD 1C), que se encuentra en unidades de USD/galón, por lo que se tomó el valor para Diésel ultra bajo en azufre y Gasolina grado regular y se llevó a unidades de USD/barril manteniendo la proporción de la producción. El precio final obtenido para los combustibles es de 99 USD/BARRIL. (EIA, 2023)(U.S. Energy Information Administration, n.d.)

4.5.2 Energía eléctrica

Cuando se selecciona turbina como medio de transformación del gas de tea, se obtiene energía como producto principal, para este producto se tomó un valor de 0.025 USD/kWh según información reportada. (Bnamericas, 2022b)

La razón principal de utilizar datos promedios de precios de los productos a lo largo del horizonte de planeación está relacionada con la alta fluctuación de estos datos en el tiempo debido a su relación con variables externas de tipo político, social, y económico (The Oxford Institute for Energy Studies, 2020), por lo que se analizara la influencia de estas variables en la función objetivo mediante un análisis de sensibilidad global.

4.6 Flujos de Gas de las teas

En cuanto a los flujos de gas, el Banco Mundial, en colaboración con la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA) y el Instituto Payne de Políticas Públicas de la Escuela de Minas de Colorado, ha elaborado estimaciones mundiales de la quema de gas basadas en observaciones de satélites lanzados en 2012 y 2017. Los sensores avanzados de este satélite detectan el calor emitido por las llamaradas de gas en forma de emisiones infrarrojas. La Escuela de minas de Colorado y el GGFR cuantifican estas emisiones infrarrojas y las calibran con datos nacionales recogidos por Cedigaz, un proveedor de datos externo, para producir estimaciones sólidas de los volúmenes mundiales de combustión de gas (Elvidge et al., 2013).

Teniendo en cuenta el metano como principal combustible del gas de tea, será el de mayor aporte a la intensidad de luz que perciben los rastreadores, se consideró que el volumen de gas reportado hace referencia únicamente al volumen de combustible quemado, por lo que teniendo

en cuenta que en Colombia la composición promedio de metano en el gas natural es del 80% (EITI: Extractive Industries Transparency Initiative, 2017; Velez Diez, 2021), se llevaran a 100% los flujos reportados por el Flaring Tracker (

Figura 8) para obtener el flujo total de gas, y serán considerados como volúmenes anuales de metano únicamente.

El reporte se da en Millones de Metros Cúbicos por año por pozo, pero las tecnologías se reportan en Millones de Pies Cúbicos Estándar, por lo que se realizó la conversión de estos valores.(Banco Mundial, n.d.-a)

En cada pozo puede haber varias teas, el Banco Mundial reporta estas fuentes con el mismo nombre del campo, por lo que para disminuir el número de teas y al mismo tiempo considerar todo el gas emitido se agrupo el flujo de estas fuentes y se interpretó como una sola tea.

Country	Field Name	Field Operator	Flaring Vol (million m3)
Colombia	Apiay Este	Ecopetrol	6.21
Colombia	Balcon	Ecopetrol	1.91
Colombia	Cantagallo	Ecopetrol	2.57
Colombia	Castilla	Ecopetrol	9.27

Figura 8. Ejemplo del reporte de gas de quema del Flaring Tracker del Banco Mundial

2021

Adicionalmente los flujos de gas reportados en cada pozo se dan de manera anual, pero para una mejor estimación es necesario datos en rangos de tiempo menores por lo que se consideran

periodos trimestrales por lo que se distribuyó aleatoriamente el flujo total en los 4 trimestres del año mediante un programa de aleatoriedad en Excel, en la

Tabla 4 se muestra los flujos de gas anuales, en unidades de Millones de Pies Cúbicos estándar, de las teas durante el horizonte de planificación 2012-2021.

Cabe resaltar que las teas que presentan varios flujos con valor de cero son teas que no existían para el año del reporte o no estaban en funcionamiento, pero por facilidad del modelo se reportaron todas las teas en cada año, además de que esto permite predecir un mejor y comportamiento del flujo de gas.

Tabla 4. Flujo de gas de las teas, 2012-2021

Tea	MMSCF									
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	20.13	233.08	547.38	550.21	400.83	396.94	309.01	235.90	121.13	39.91
2	0.00	33.90	215.42	129.25	61.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	951.03	808.01	698.18	699.94	371.87	391.64	281.11	260.62	250.03	219.31
4	435.79	553.39	592.23	254.97	168.10	197.41	220.01	196.70	112.65	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	67.45
6	40.97	22.25	117.95	173.75	63.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	31.78	82.28	86.52	11.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	110.89	220.37	293.82	97.12	88.99	28.61	55.44	0.00	0.00	90.76
9	298.76	304.77	189.29	243.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	559.04	677.34	471.10	1106.42	960.21	814.72	801.30	654.03	981.05	396.23
11	121.48	132.78	78.40	46.62	58.62	114.42	175.87	81.93	49.44	16.60
12	2639.44	2744.33	2273.93	2961.16	4050.98	3900.54	3484.53	3554.10	1582.47	1788.00
13	83.70	91.82	54.74	50.15	0.00	0.00	25.07	26.84	7.42	0.00
14	2347.03	2187.76	950.68	1212.72	786.11	1274.17	1121.25	614.48	519.13	302.30
15	1150.92	1277.34	1947.62	1810.60	1236.03	891.00	345.73	470.75	404.00	874.05
16	104.53	10.24	14.48	6.00	0.00	0.00	31.08	0.00	0.00	0.00
17	79.46	13.42	221.43	146.20	64.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	285.70	22.95	0.00	40.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	966.22	1340.91	1634.03	1225.43	723.25	716.54	809.42	776.22	434.37	354.21
20	329.14	811.89	845.44	663.92	283.23	228.13	621.54	252.86	131.02	129.96

Tea	MMSCF									
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.71	0.00	0.00	0.00	15.19
22	29.31	217.54	119.36	98.18	38.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	119.01	776.93	654.39	109.83	211.89	0.00	0.00	230.25	65.69	74.51
24	0.00	48.73	355.98	5.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	120.07	0.00	0.00	0.00
26	864.86	557.62	1098.30	892.41	446.73	189.64	362.69	165.63	164.21	166.33
27	1082.40	781.17	1101.12	1644.27	1236.73	1140.67	462.27	313.60	374.69	410.01
28	2083.59	465.80	81.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	88.64	17.30
30	164.92	4.94	24.01	8.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
31	211.18	199.18	218.95	316.78	73.46	62.86	51.21	0.00	81.58	97.12
32	143.03	769.16	609.18	812.60	555.50	630.37	528.67	515.60	381.40	2.12
33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	111.24	325.25	374.34	771.28	592.23
34	220.37	202.35	329.84	218.60	138.08	143.03	95.00	31.43	74.16	43.08
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	43.08	115.13	163.86
TOTAL	15475	15592	15826	15536	12019	11245	10227	8798	6709	5861

1.7 Beneficios tributarios

En el marco de la política pública sobre cambio climático y el compromiso con metas internacionales en esta materia, el estado colombiano ha implementado una serie de herramientas económicas y de mercado. Su objetivo principal es separar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del crecimiento económico.

Estas herramientas buscan internalizar los costos sociales y ambientales asociados con la emisión de GEI en las actividades productivas.

Los beneficios tributarios son como su nombre lo indica beneficios económicos que promueve el Gobierno Nacional, a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y junto con otras entidades, a organizaciones interesadas en proteger el ambiente y avanzar hacia una economía baja en carbono. (Ministerio de Ambiente, n.d.)(Olga Lucía Bedoya Mesa, 2022)

La Ley 1715 de 2014, conocida como la "Ley de Transición Energética", establece medidas para promover el uso de fuentes de energía renovable y sostenible en el país. Dentro de los beneficios que se pueden obtener se encuentra descuento en las inversiones realizadas que puede ser hasta del total de la inversión, a partir de esta información, y con la hipótesis de que el proyecto planteado reducirá las emisiones generadas, se tomó un valor medio de 50% como beneficios tributarios del caso base.(Alberto Mejia, 2022)(Comunicaciones Ambientalmente, 2021, 2022)

1.8 Factores de emisión

Para el volumen de emisiones producidas por la turbina, se tendrá en cuenta la información plasmada por la UPME en la herramienta digital FECOC 2016, la cual tiene como objeto facilitar el cálculo de emisiones de CO₂ generados por el aprovechamiento energético de los combustibles que actualmente hacen parte importante de la canasta energética colombiana, (UPME, n.d.).

Las emisiones totales se obtienen introduciendo en la herramienta el volumen de gas que se utilizó, *GASPROCESSED*, y un porcentaje de aire que se escogió como 20%. En nuestro caso para el gas de tea, el más afín con la información reportada en la aplicación, es el gas de pozo Cupiagua.

Posteriormente se compararán estas emisiones, con el procesamiento de gas por las tecnologías convencionales, en el caso de las turbinas, la empresa reporta que el Diésel es el combustible que se usa actualmente para operar las turbinas.

Para la tecnología GTL, varios autores indican que la diferencia entre el factor de emisión de las refinerías y de las GTL es de $\pm 5\%$ por lo que no se considera apreciable, (UPME-ANH-Unión Temporal CTL, 2007). La principal reducción de emisiones se aprecia en el uso de los

combustibles generados. Para el caso evaluado solo se considerará la etapa de refinación por lo tanto se usará el factor reportado por Ecopetrol en el reporte de Metas Ambientales, Sociales y de Gobernanza.(UPME, n.d.)(Liderazgo, 2020)

5. Estrategia de solución Basada en Clústeres

La aplicación del estudio de caso descrito anteriormente da lugar a un modelo mixto entero lineal con las siguientes estadísticas: 62664 ecuaciones, 29113 variables continuas, y 76081 variables enteras. Esto corresponde a un modelo de gran escala, por lo que la convergencia del modelo es compleja requiriendo tiempos de ejecución altos. Para ello se diseñó una estrategia iterativa basada en clústeres para reducir sistemáticamente el tamaño del problema de optimización. Este concepto ha sido aplicado en otros casos como, Calderón & Pekney, 2020, en su modelo matemático para recobro mejorado de petróleo en reservorios no convencionales.

Se realizaron pruebas mediante dos criterios para la selección de los clústeres, la ubicación geográfica de las teas e ingresos por tea y se identificó la variable $INCOME_{i,t}$, asociada a los ingresos obtenidos en determinado periodo de tiempo por la venta de los productos, como una variable con mayor impacto en la función objetivo.

Primeramente, se definen: el tamaño de los clústeres, lo que para este caso corresponde al número de teas por clúster, el número de iteraciones por clúster (itr) y el número de iteraciones globales ($Gitr$), luego de esto se crea la solución factible corriendo el modelo monolítico un tiempo

t definido por el desarrollador, con estos resultados se calcula los ingresos (*INCOME*) asociado a cada tea, ordenados de mayor a menor, los cuales se usan para crear los clústeres.

Una vez creado los clústeres se fija la variable entera *PLANT*, que posterior a numerosas pruebas resulto como variable crítica para la convergencia del modelo, esta misma variable es liberada posteriormente para todas las teas (i) que correspondan al clúster b , se optimiza el modelo reducido y se continua con el siguiente clúster hasta que las iteraciones sean menores o iguales a las iteraciones globales. a y b actúan como contadores.

El diagrama de flujo presentado en la Figura 9, refleja el paso a paso que se lleva a cabo en el desarrollo de la estrategia.

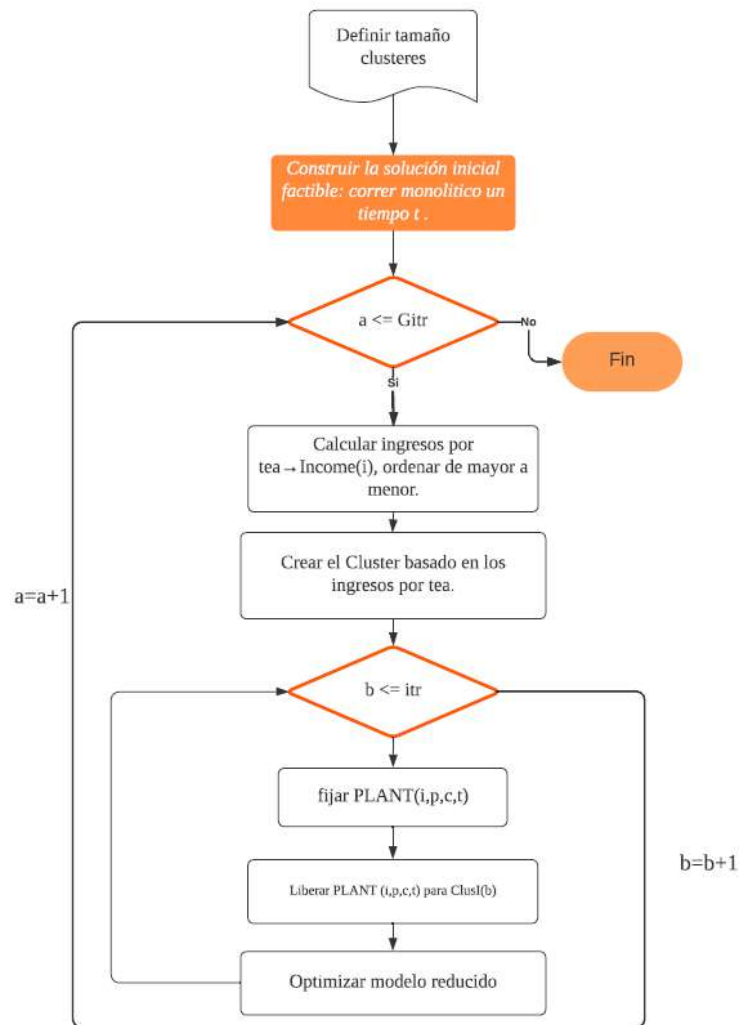


Figura 9. Diagrama de flujo estrategia Clúster. Consistente en encontrar las variables que generan un impacto en el procesamiento de datos del modelo y a partir de ellas generar clústeres o grupos de datos para encontrar una solución factible y a partir de esta encontrar la solución.

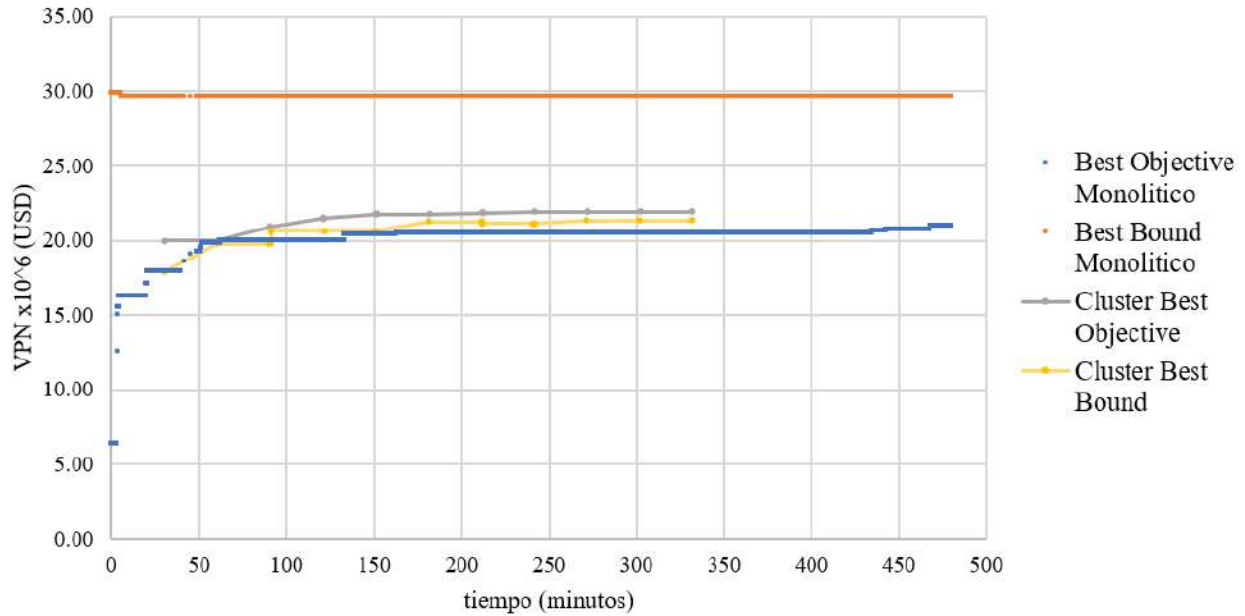


Figura 10. Resultados estrategia clústeres. Usada para reducir el tiempo de procesamiento del modelo

La estrategia propuesta no garantiza encontrar el óptimo global, sin embargo, reduce drásticamente los tiempos de ejecución y aumenta la calidad de la solución final en comparación con la resolución del modelo original como se observa en la Figura 10.

El BestObjective corresponde al objetivo de la mejor solución factible conocida, mientras que el BestBound proporciona un límite sobre el mejor objetivo posible.

Después de 8 horas, la optimización del modelo monolítico, es decir el modelo original, encontró una solución de \$21 Millones de dólares MMUSD, sin embargo, mediante la implementación de la estrategia fue posible mejorar ligeramente la solución a \$21.9 MMUSD en 5 horas, lo que representa una reducción considerable (3 horas) en el tiempo de ejecución.

RESULTADOS

De un análisis del desarrollo óptimo en el diseño de la cadena de suministro para el aprovechamiento de gas de tea usando tecnologías a pequeña escala, en primer lugar, se analiza el impacto de los beneficios económicos asociados a proyectos de reducción de la huella de carbono y grandes proyectos en general comparándolo con una situación de referencia en la que sólo se optimiza utilizando tecnologías a pequeña escala. A continuación, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad global para estudiar el efecto de la incertidumbre asociada a los parámetros de entrada sobre los aspectos económicos de la cadena de suministro.

El modelo se programó en Pyomo (GabiellAHackebeill et al., 2021; Hart et al., 2011), una librería de Python especializada en optimización matemática y se resolvió usando Gurobi V.10.0.1 (Gurobi Optimization, 2023), solver a nivel del estado del arte. Todas las ejecuciones de escenarios se realizaron en un Lenovo con CPU Intel® Core™ i5-7200 a 2.50 GHz y 8 GB de RAM con Windows 10 Home Single® (sistema operativo de 64 bits). El criterio de optimalidad para las iteraciones de los clústeres se fijó en menor o igual al 5%. Los datos utilizados en el desarrollo del modelo son datos bibliográficos, reportados principalmente por el Banco Mundial. Para todos los análisis se consideró un horizonte de planeación de 10 años, dividido en trimestres, para un total de 40 periodos, $\gamma = 2.5\%$ (*periodo*) y 35 teas. Los precios de los productos obtenidos e impuesto al carbono se consideran fijos. Se fijaron targets de quema de la siguiente manera: Se fijó un target inicial de 70% durante 4 trimestres y luego se fue reduciendo un 5% cada 4 trimestres hasta llegar a un target final de 40%. Se analizaron dos tecnologías de aprovechamiento con tres capacidades cada una.

A continuación, se presentan los resultados del modelo matemático.

6.1 Casos de Análisis

Para el primer análisis se planteó un escenario sin beneficios económicos en el proyecto, es decir las variables valor de salvamento (*SVALUE*), beneficios tributarios (*TAXBENEFITS*) y depreciación acelerada (*Adep*) tienen un valor de cero.

Posteriormente en un segundo análisis, se incluyeron estas variables de la siguiente manera: se consideró un valor de salvamento de 30% al final del horizonte de planeación, los beneficios tributarios serán del 70% y la depreciación acelerada será de un 20% los primeros 5 años después de cada compra de plantas (GTL, Turbina).

6.2 Maximización del Valor Presente Neto

El valor presente neto se halló acorde a la *Ecuación (1)*, que descompone el VPN en flujo de caja, gastos capitales e impuesto al carbono, todo llevando los datos a valor presente mediante la tasa de descuento, los resultados se muestran en la Figura 11.

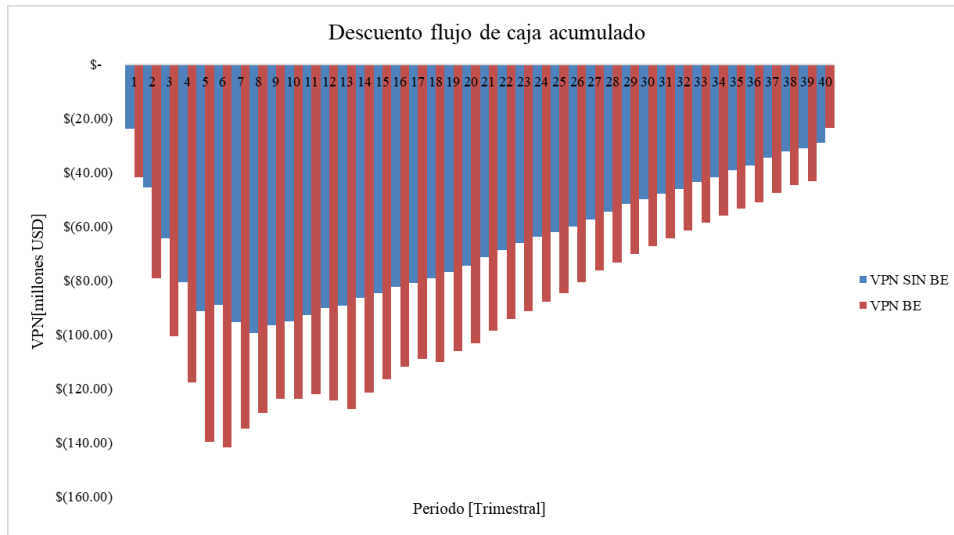
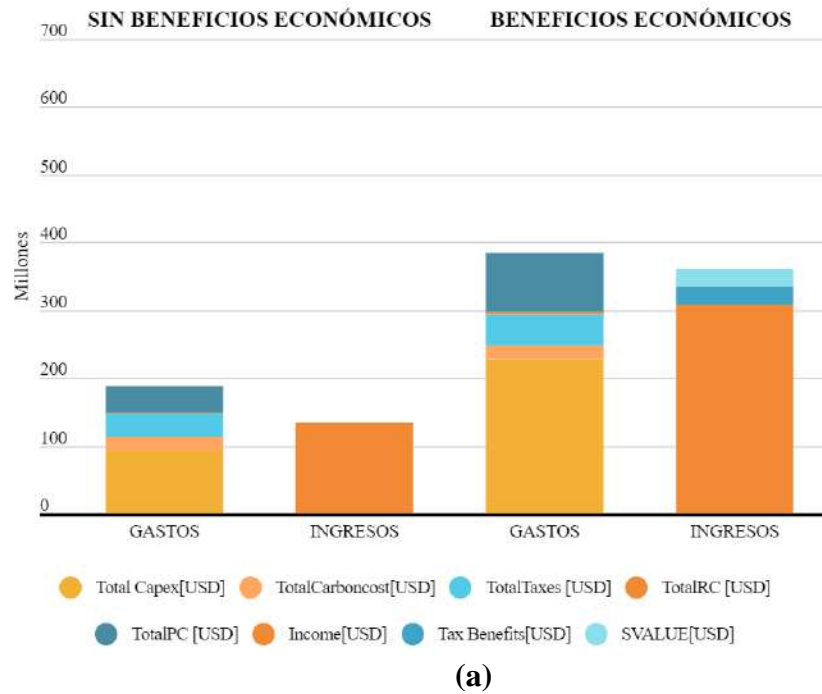


Figura 11. Resultados Valor Presente Neto caso con beneficios económicos y caso sin beneficios económicos.

En la Figura 11 se ilustra el resumen de los resultados económicos de los escenarios de referencia, se observa que para ninguno de los dos análisis se obtuvo un beneficio económico al

implementar estas tecnologías como método de aprovechamiento del gas de tea, sin embargo, cuando se aplican beneficios económicos estos, tienden a acercar el Valor Presente Neto (VPN) a un resultado económico positivo.

El VPN del escenario base es de -\$54 millones de dólares. Una vez aplicados los beneficios económicos, el VPN aumenta en 31.5 millones de dólares hasta alcanzar un valor de -\$22.5 millones de dólares. El CAPEX y el OPEX aumentaron un 1.5 y 1.25 veces respectivamente, impulsados por los beneficios económicos asociados al tipo de proyecto. En cambio, los ingresos totales aumentaron un 67% con respecto al caso base, de los cuales un 42% se asocia a un aumento de las ventas de energía y combustibles líquidos, mientras que un 25% se debe a nuevas fuentes de ingresos procedente de los beneficios tributarios y el valor de salvamento de las tecnologías. En ambos escenarios, la cadena se desarrolló con un total de 35 teas de producción, sin embargo, en el escenario con beneficios económicos, se compran 35 plantas más para el procesamiento del gas de tea, en la Tabla 5, se observa la relación de las tecnologías compradas para los casos propuestos.

El flujo de caja descontado acumulativo, presentado en la Figura 10b, muestra que bajo las condiciones establecidas en los casos anteriores no se logra línea base de beneficios, sin embargo, cuando se aplican los beneficios económicos, esta diferencia en el VPN disminuye drásticamente en el último periodo de tiempo.

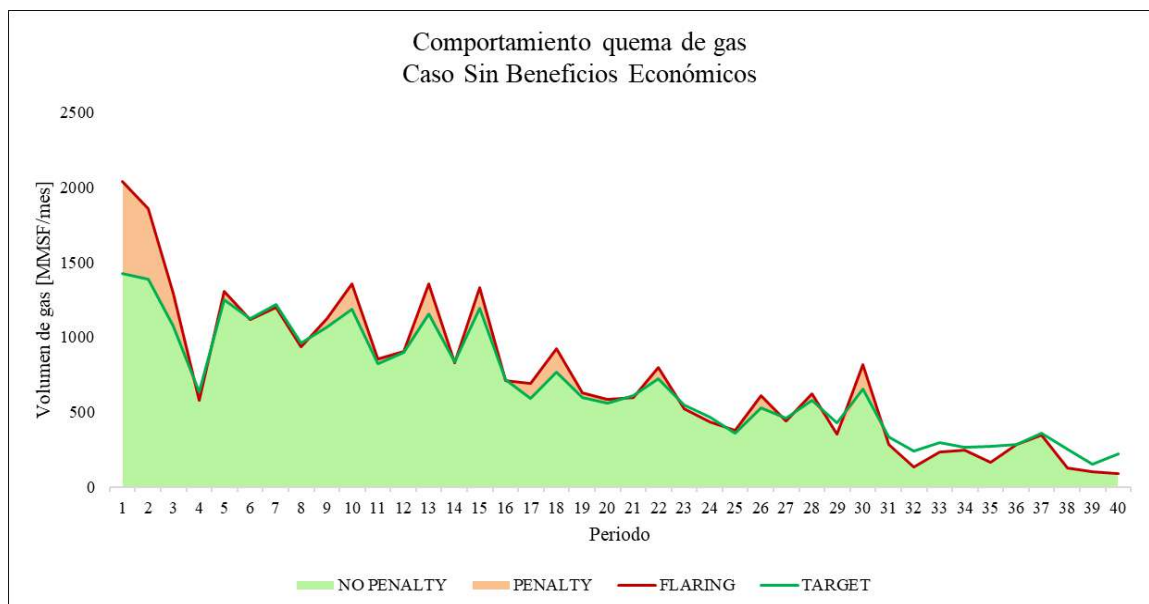
Tabla 5. Tecnologías compradas en cada caso

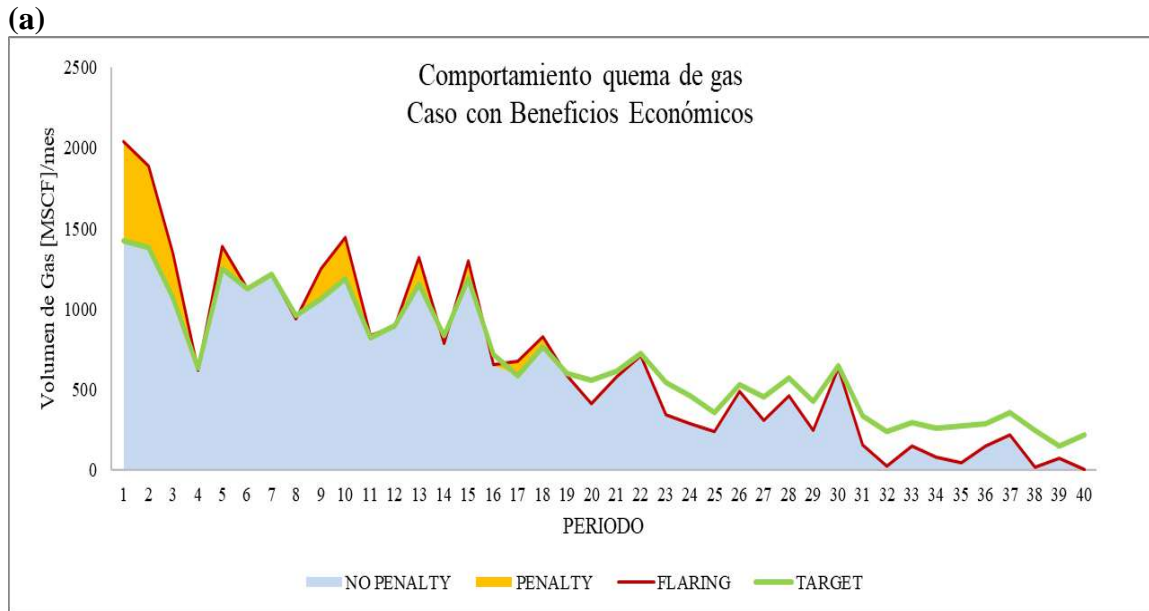
TIPO DE TECNOLOGÍA	CAPACIDAD [MMSCF mes]	SIN	CON
		BENEFICIOS	BENEFICIOS
TURBINA		NÚMERO DE PLANTAS	
	4	0	2

	20	3	5
	40	15	7
GTL	10	0	20
	50	0	4
	100	0	13
TOTAL		18	51

Se puede deducir que los beneficios económicos impulsan la compra de tecnologías, puesto cuando no hay beneficios, la tecnología preferente para realizar el aprovechamiento del gas de tea son las turbinas, sin embargo, cuando se incluyen los beneficios económicos se promueve la compra y uso de tecnologías GTL, inclusive superando la cantidad total de turbinas implementadas, importante recordar que las tecnologías se pueden acoplar entre sí y en las restricciones se mencionó que es posible tener hasta un máximo de 3 tecnologías por tea por lo que el número de tecnologías puede superar el número de teas.

Se puede deducir que el beneficio económico de mayor impacto en este cambio es el valor de salvamento, que en la Figura 11 a que genera un ingreso adicional aproximado de 30 Millones de dólares impulsando el aumento en el VPN.





(b)
Figura 12. Comparación resultados comportamiento de quema de gas casos sin beneficios económicos (a) y con beneficios económicos (b)

Otro factor importante para analizar son las emisiones, se planteó un objetivo de quema, *TARGET* decreciente iniciando en 70%, valor que decrece cada 8 periodos hasta un mínimo de 40%, este porcentaje es el máximo volumen de gas permitido para quemar, $FLARING_t$, de acuerdo al volumen de producción de cada tea. Si se supera esta cifra, el excedente tendrá un costo que penaliza la función objetivo, en caso contrario, si el volumen quemado es igual o menor al objetivo, no se cobra impuesto de carbono, $CARBONTAX_t$. En la Figura 12, se observa el comportamiento de cada caso frente a la quema de gas.

Al aplicar beneficios económicos el tiempo en que se logra el equilibrio entre el gas de quema y el target disminuye de 30 periodos (120 meses) a 19 (76 meses), lo que a su vez significa que cuando no hay beneficios económicos, se debe pagar impuesto de carbono durante 30 periodos 10 periodos más que cuando se aplican beneficios económicos. Después del periodo 30 es más

notable que el volumen de gas no penalizado disminuye respecto al caso inicial, y al no haber gas penalizado, significa que el gas procesado aumenta como se muestra en la Figura 13.

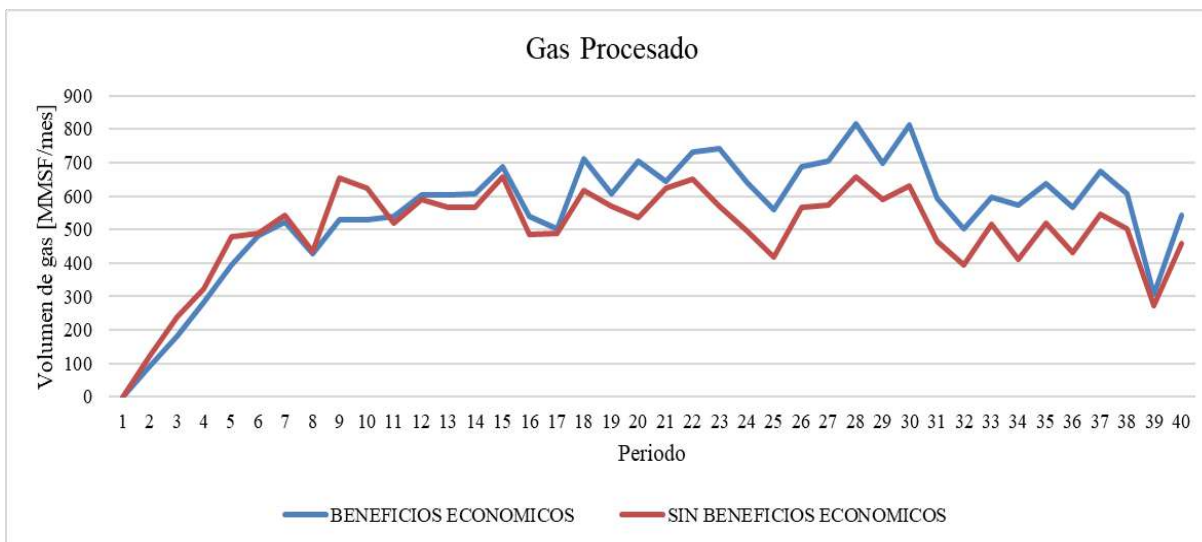


Figura 13. Comparación resultados Volumen de Gas Procesado en cada escenario, con beneficios económicos y sin beneficios económicos

Con las condiciones consideradas, el caso base no es económicamente viable, incluso al incorporar beneficios económicos, es por ello que se va a extender el análisis para considerar rangos de variación de algunos parámetros con el objetivo de identificar los parámetros claves y valores que hagan que la monetización del gas de tea sea económicamente viable.

6.3 Potencial de descarbonización

Las emisiones actuales del horizonte de planeación propuesto indican que, solo quemando el gas mediante la tea, se generan emisiones de CO₂ por un valor aproximado de 11 Millones de Toneladas (MTon), en el mejor escenario (VPN más alto) se logra una reducción de emisiones de 2 MTON CO₂, mientras que, en el peor escenario, se logra una reducción de aproximadamente 3 MTON CO₂, como se puede observar en la Figura 14.

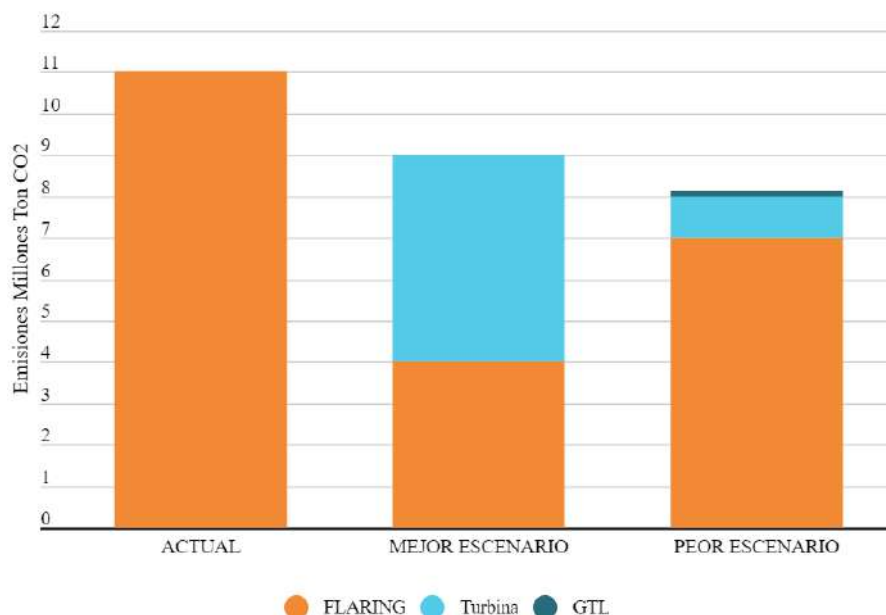


Figura 14. Comparación generación de emisiones de CO₂ actuales vs mejor y peor escenario de VPN

Para el caso del potencial de descarbonización, como se mencionó anteriormente, la tecnología GTL vs Refinería, no se observa mayor diferencia, puesto que, según bibliografía, el impacto que genera la tecnología GTL, se observa en las propiedades de los combustibles generados ya que en términos de refinación el factor de emisiones varía en $\pm 5\%$ (NRDC, 2011), por tanto, como se observa en la Figura 15, no hay diferencia.

En el caso de las turbinas para ambos escenarios se puede apreciar una notable disminución de las emisiones, respecto a la generación de energía mediante gas de tea y mediante Diesel, para el caso del mejor escenario se consigue un potencial aproximado de 20Mton CO₂, mientras que para el peor escenario este potencial es de aproximadamente 6Mton CO₂, hay que considerar que esta diferencia concuerda con el gas procesado, puesto que en el mejor escenario se procesaron, a través de turbinas, cerca de 90MMSCF de gas y en el peor escenario 30 MMSCF, por lo que se guarda la relación de un factor de 3 en el potencial de descarbonización.

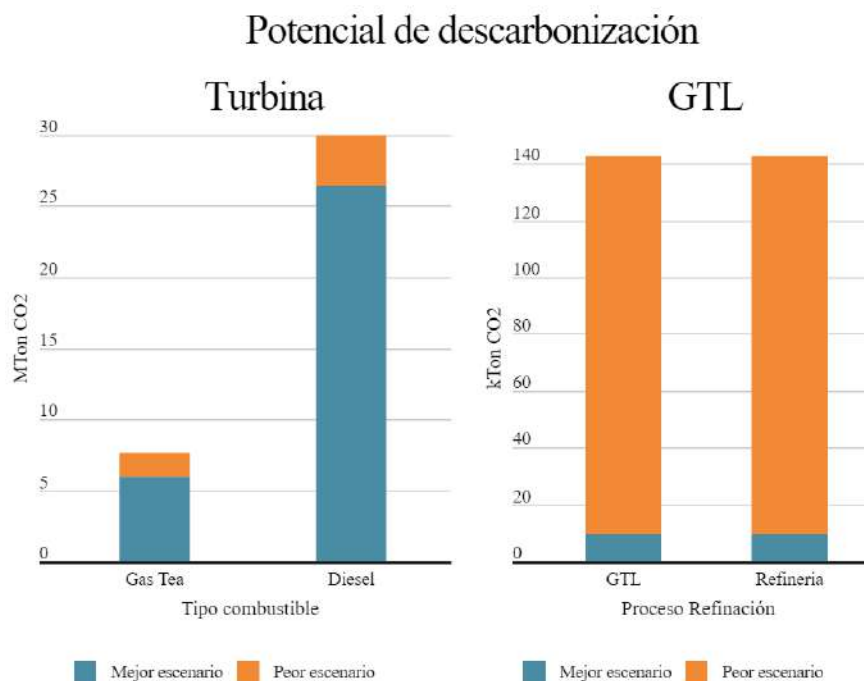


Figura 15. Potencial de descarbonización de las tecnologías Turbina y GTL en el mejor y peor escenario

6.4 Análisis de Sensibilidad

En esta sección ampliamos nuestro análisis anterior para la variabilidad inherente de los principales parámetros de entrada y su efecto en la rentabilidad del aprovechamiento de gas tea utilizando tecnologías a pequeña escala turbinas y GTL. Para ello, nos basamos en técnicas de análisis de sensibilidad global (GSA), que proporcionan una metodología robusta para abordar simultáneamente la variación de múltiples parámetros de entrada y su efecto combinado en las variables de salida.

Los parámetros GSA seleccionados y sus rangos se muestran en la Tabla 6. los rangos se establecen teniendo en cuenta, en el caso del valor de salvamento que las maquinarias no tengan ningún valor al final del horizonte o si lo tienen es de máximo 30% el valor inicial de compra. En

el impuesto a carbono se estimó un valor de 40 USD/TonCO₂, siendo este el valor cobrado actualmente según datos del Banco Mundial, hasta un máximo de 100 USD/TonCO₂.(Econometría SA, 2021), Fcapex y Fopex, son factores que permiten variar el valor de compra de las tecnologías en un rango $\pm 30\%$ con respecto al caso base. Los beneficios tributarios pueden variar desde cero hasta un máximo de 70%, que es lo que se referencia que se obtiene como máximo beneficio en la mayoría de casos. Finalmente, para los precios, se encontró en literatura diferentes rangos a lo largo de los años y se tomaron los extremos encontrados para establecer el rango.(Bnamericas, 2022a) (Bnamericas, 2022b)(EIA, 2023)

Tabla 6. Variables análisis de sensibilidad

	SVALUE	CARBON TAX	Fcapex	Fopex	TAX BENEFITS	PriceGTL	PriceTurbina
Unidades	%	USD/TonCO ₂			%	USD/Barril	USD/kWh
Valor Min:	0	40	0.7	0.7	0	90	0.025
Valor Max:	30%	100	1.3	1.3	70	140	0.080

El análisis de sensibilidad se basó en el cálculo de índices de Sobol, para lo cual se utilizó el software SobolGSA(Kucherenko S, n.d.). Las características principales de Sobol, se puede resumir como:

No requiere un número elevado de escenarios para garantizar la convergencia del método. Lo cual beneficia su implementación en casos donde la convergencia del modelo es lenta lo que limita la cantidad de escenarios que se pueden generar. Como referencia, técnicas como Montecarlo requiere de miles de escenarios para asegurar convergencia de los índices de

sensibilidad. En el caso de Sobol, para modelos MILP, en literatura se han usado 64, 128, y 256 escenarios. (Calderón & Pekney, 2020) (Guerra et al., 2018)

Sobol permite evaluar el impacto de los parámetros inciertos de manera individual y conjunta mediante la estimación de efectos de primer orden, y efectos totales. Los efectos de primer orden estiman el impacto de la variación de los parámetros inciertos individuales en las variables de salida. Los efectos totales tienen en cuenta los parámetros inciertos y su impacto combinado en las variables de salida.(Calderón & Pekney, 2020)

Sobol no asume linealidad entre los parámetros inciertos y las t de salida. Lo cual permite que sea implementado para analizar modelos altamente complejos, tales como modelos MILP de gran escala.

Una vez definidos los rangos, se asignaron funciones de distribución uniformes a cada parámetro de sensibilidad. Se generó un total de 128 escenarios cuyos resultados optimizados se utilizaron para calcular los índices de sensibilidad para los efectos de primer orden y los efectos totales.

Los resultados correspondientes se resumen en la Figura 16.

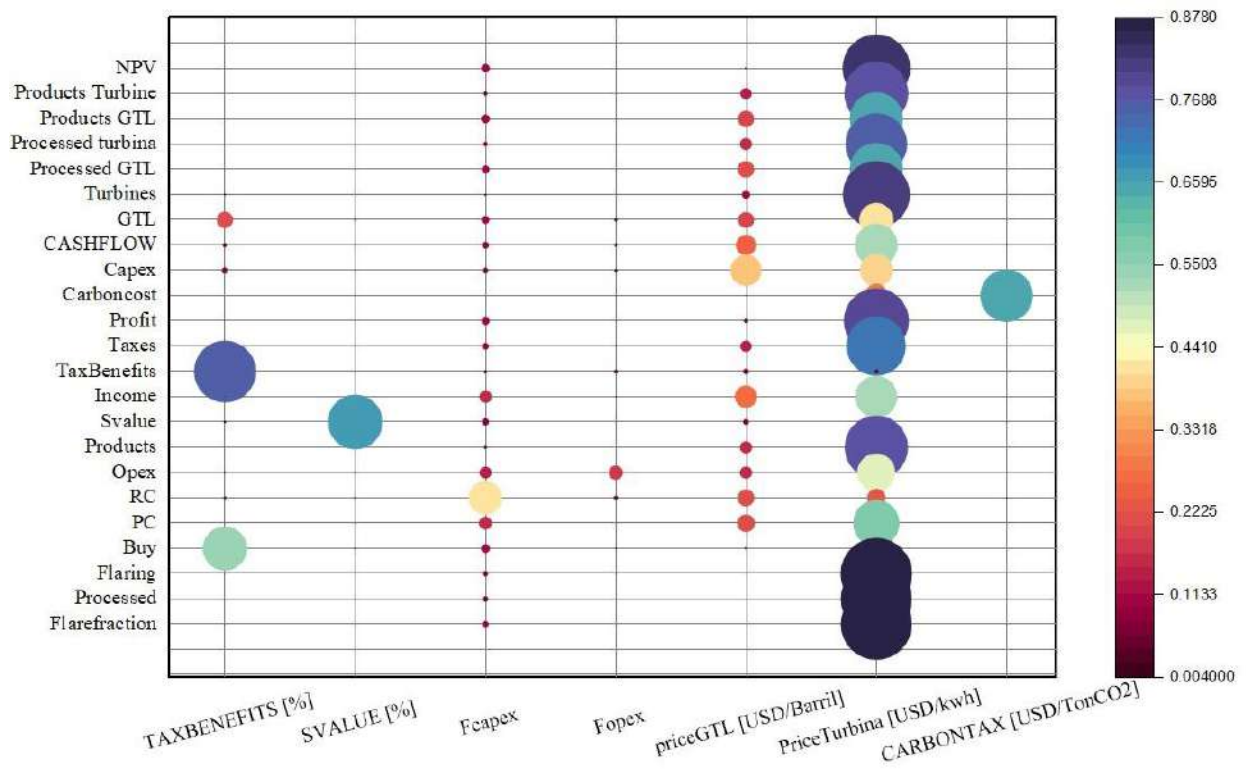


Figura 16. Resultados comportamiento variables del modelo frente a los parámetros sensibilizados mediante el GSA

El eje horizontal corresponde a los parámetros sensibilizados. El eje vertical corresponde a las variables afectadas. Los efectos de primer orden se representan con el tamaño de la esfera mientras que los efectos totales se representan con el color.

En la Figura 17 se observa la variación del VPN que esta entre -\$100.7 millones de dólares, hasta \$301,7 millones de dólares, con una media de \$99 millones de dólares.

El primer cuartil (Q1) representa el valor que separa el 25% inferior de los datos del 75% superior, en este caso un VPN de 31.18 millones USD, el segundo cuartil (Q2) o mediana es el valor que separa el 50% inferior del 50% superior correspondiente a 93.18 millones USD, y el

tercer cuartil (Q3) es el valor que separa el 75% inferior del 25% superior de los datos para este caso 171.4 millones USD.

Por último, en términos de productos para el mejor escenario se logró la producción y generación de 203kBBL de combustibles y 13300 MWh respectivamente, mientras que para el peor escenario la producción y generación fue de 2.9MBBL de combustible y 3840 MWh, lo que resalta nuevamente el impacto del precio de venta de energía en el VPN.

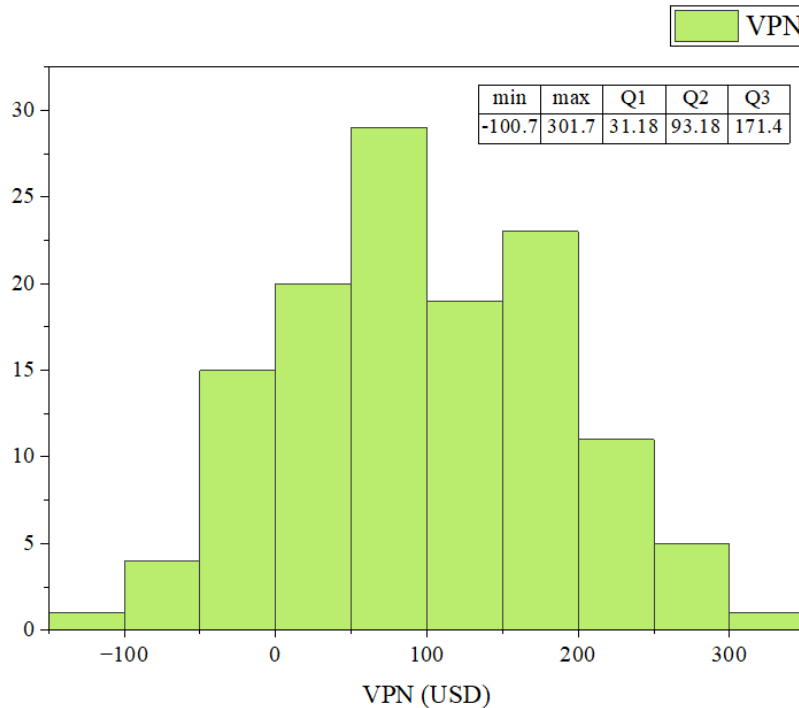


Figura 17. Histograma variación VPN en GSA

La diferencia de VPN entre el peor y el mejor se debe principalmente al precio de venta de la energía producida, el aumento de los ingresos generados por la venta de los productos es de ~37%. Esto se confirma con los resultados del GSA presentados en la Figura 16, en los que el VPN se ve muy influido por el precio de venta de la energía eléctrica (PriceTurbine). En cuanto a la actividad de quema en tea, el peor caso económico alcanzó una quema total del 63%, lo que

significa que solo el 37% de la producción de gas se aprovechó, mientras que el mejor caso alcanzó una quema media del 36%, es decir hubo un aprovechamiento del 64% del gas de tea. La actividad de quema en tea en el mejor de los casos se explica principalmente por el aumento de la compra de tecnologías, 66 en el mejor caso, 19 en el peor caso, lo que inevitablemente provoca un aumento del aprovechamiento de gas. Los valores de los parámetros en cada caso se reportan en la Tabla 7.

La Figura 16 indica que el VPN se ve afectado en igual medida por el valor de salvamento y el impuesto al carbono, seguidos de la variación del CAPEX y del OPEX. Además, la tasa de utilización del gas de tea. La tasa de utilización del gas varía entre ~783 MSCF/mes y 459 MSCF/mes, con una utilización media del gas de 677 MSCF/mes.

En general, este resultado revela que la economía se ve afectada casi que exclusivamente por la variabilidad del precio de venta de la energía, mientras que los gastos capitales y operativos tienen un efecto mínimo, al igual que los programas gubernamentales que promueven este tipo de proyectos.

Tabla 7. Variables sensibilizadas mayor VPN

	SVALUE	CARBON TAX	Fcapex	Fopex	TAX BENEFITS	PriceGTL	PriceTurbina
Unidades	%	USD/TonCO ₂			%	USD/Barril	USD/kWh
Valor mejor VPN	10.55	44.22	0.74	0.77	46.48	129.45	0.077
Valor peor VPN	20.63	73.75	1.19	1.19	48.13	99.38	0.024

6.4 VPN y Relocalización de las plantas

Se planteó que las tecnologías a utilizar se pudiesen movilizar de un sitio a otro, principalmente para aprovechar la intermitencia de los flujos de los volúmenes del gas de las teas.

Sin embargo, se quiere analizar de la movilidad de las plantas en el objetivo principal que es obtener las mayores ganancias a partir de aprovechar estas fuentes. En la Figura 18, se refleja el comportamiento de las variables económicas para el mejor y peor escenario cuando se fijan las plantas y cuando se dejan móviles.

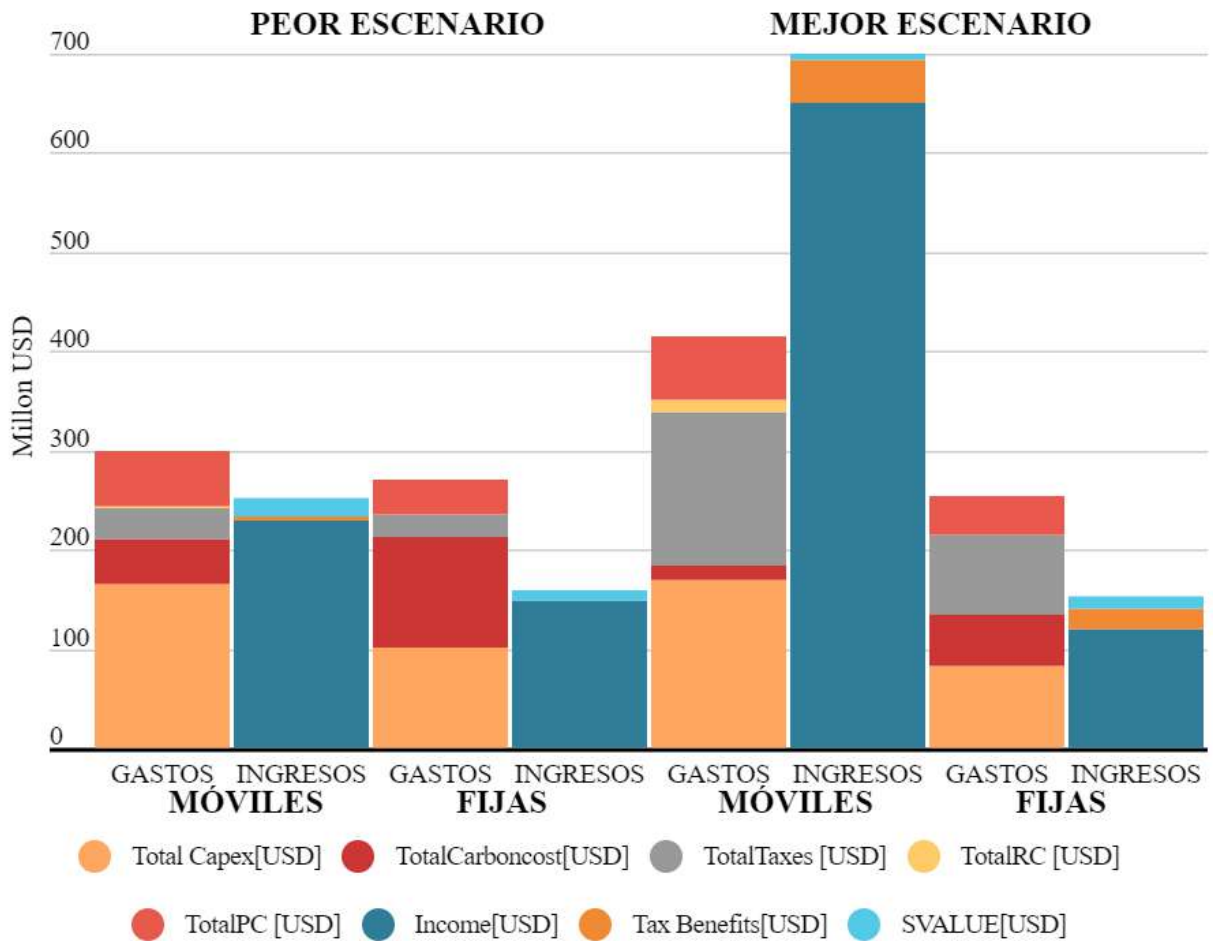


Figura 18. Resultados de las variables económicas en función de la movilidad de las plantas para el mejor y peor escenario del GSA

Cuando las plantas se fijan, el VPN disminuye en ambos casos, en el mejor escenario se reducen las ganancias en aproximadamente 200 MUS\$D, y en el peor escenario 50 MUS\$D. Esto se

debe a que cuando las tecnologías están fijas, se compran menos plantas, como se refleja en el CAPEX, por tanto, se procesa menos gas, por ende, se obtendrán menos productos y por tal motivo menos ingresos, en comparación con los escenarios donde las tecnologías se pueden movilizar.

Adicionalmente se realizó una comparativa posterior al GSA, comparando la movilidad en el peor y mejor escenario en términos de los movimientos de las plantas, recapitulando que en el mejor escenario el VPN fue de 301 Millones de dólares en comparación con -100 Millones de dólares, en el mejor escenario los movimientos aumentan en un factor de 8 veces pasando de 43 movimientos efectuados entre un total de 10 turbinas y 9 plantas GT, a 334 movimientos efectuados por 61 turbinas y 5 GTL. En la Figura 19 se ilustran los movimientos de las plantas en ambos casos.

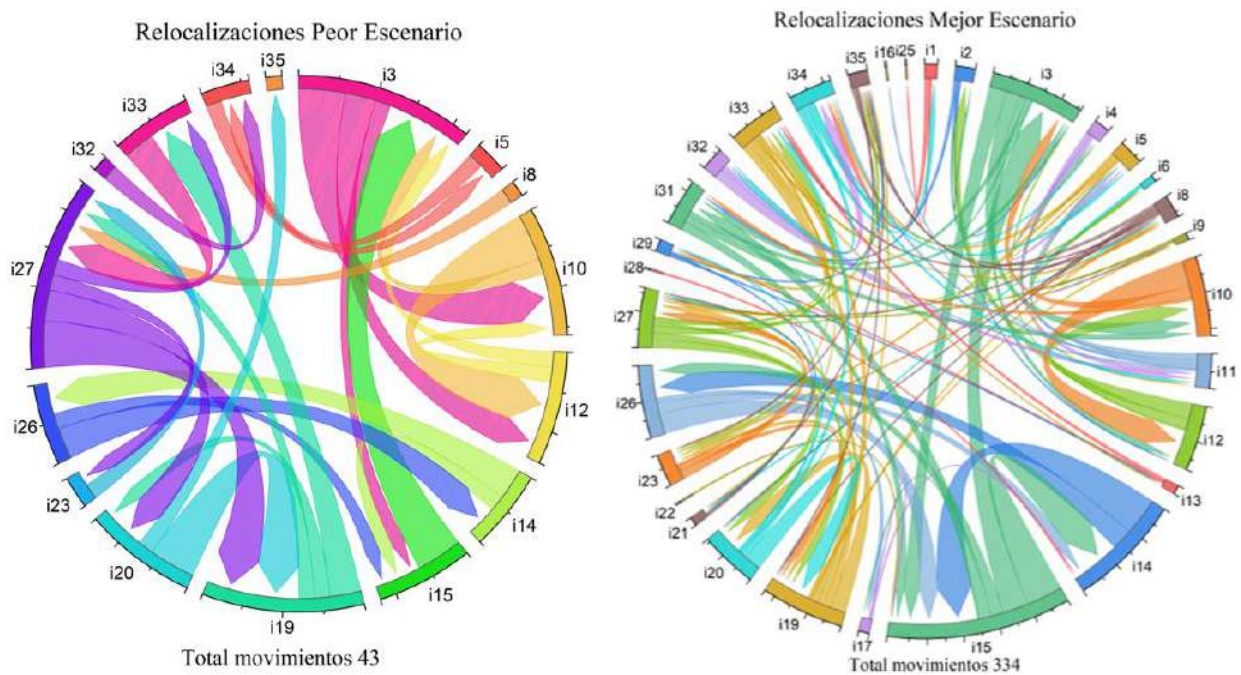


Figura 19. Movimientos de las plantas mejor y peor escenario

Al igual que (Tan & Barton, 2015), identificamos la movilidad de las plantas como una variable clave en la rentabilidad del proyecto.

7. CONCLUSIONES

Los boletines técnicos emitidos por el Banco Mundial sobre las tecnologías mini GTL y microturbinas, permitieron identificar las condiciones necesarias bajo las cuales la monetización del gas de tea puede ser rentable. Para este caso en específico, esta rentabilidad económica, se traduce en un VPN de 300 millones de dólares en un horizonte temporal de diez años, con una inversión de 170 millones de dólares.

En el caso de selección de tecnologías, ambas se muestran atractivas, sin embargo, en el mejor VPN, la tecnología de las turbinas predomina en cantidad sobre las GTL (61 Turbinas -5 GTL). La estrategia con mejor VPN implica la aplicación de plantas de Turbinas de gran capacidad a las fuentes de gas con mayor producción inicial, seguidas de plantas de tamaño medio a las mismas fuentes, seguidas de turbinas de menor cuando la producción de gas haya disminuido.

En términos de quema de gas, el modelo reporta una disminución total al final del horizonte de planeación, de 20% de las emisiones, correspondiente a aproximados 2 Mton CO₂.

La movilidad de las plantas resultó ser un parámetro de impacto sobre el incremento del VPN, aumentando en un factor de 4 el VPN sobre el caso donde se fijaban las plantas.

El modelo matemático propuesto requirió del diseño de una estrategia de solución con base en las características del modelo y de la topología de los casos de estudio, consistente en la implementación de la estrategia de clústeres lo que permitió la reducción del tiempo de convergencia y mejora en la solución del modelo matemático, antes de la implementación de la estrategia no se había logrado obtener un óptimo para el caso de análisis de sensibilidad.

El modelo propuesto permite asignar plantas móviles de forma dinámica para monetizar el gas de tea, de modo que se maximice el valor presente neto de la cadena de suministro, sin embargo, la monetización de los gases aplicando la metodología propuesta solo obtuvo un valor positivo en casos donde se aplicaban beneficios económicos como depreciación acelerada, beneficios tributarios ambientales, entre otros.

Los estudios de sensibilidad de los parámetros económicos indicaron que el VPN es rentable en 108 de los 128 escenarios propuestos, lo que indica una proporción de 84% escenarios rentables para la aplicación de estas tecnologías. Adicionalmente el análisis de sensibilidad indica el precio de la electricidad (PriceTurbine), como el parámetro de mayor influencia sobre el VPN.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar técnicas de optimización estocástica para poder analizar la incertidumbre, como lo es la falencia de información acerca del gas de tea en cuanto a precisión en volumen, composición, caracterización entre otros factores que afectan directamente la conversión, así como también los tiempos de recorrido entre las teas, la demanda de los productos y demás.

Contemplar la posibilidad de modificar/ajustar el modelo para análisis de otras políticas ya sean económicas, ambientales u otro ámbito que hagan viable el diseño de este tipo de cadenas de suministro.

Desde el punto de vista de la estrategia de solución del modelo, debería seguirse trabajando con estrategias de descomposición matemática como estrategias de descomposición Lagrangianas (Mora, 2018), que permiten aislar el problema de manera espacial y temporal, una alternativa que

se puede intentar es la combinación de clústeres con estas descomposiciones, fijando un clúster, descomponiendo el problema y optimizando. Adicionalmente se sugiere extender el modelo con un módulo de análisis de ciclo de vida, y realizar optimización multiobjetivo que permita encontrar los mejores resultados que beneficien tanto económica como ambientalmente.

Se recomienda ampliar los análisis de contribuciones de los parámetros respecto a otros parámetros como el objetivo de quema, el volumen de gas de tea, entre otros, durante el proceso de optimización, de igual manera para mejores predicciones se puede mejorar la estimación de precios, considerando las posibles variaciones entre periodos o anuales.

La aplicabilidad del modelo no se reduce solo asignación de plantas móviles para aprovechamiento de gas de tea, podría utilizarse para resolver los problemas conocidos como problemas del viajero, teniendo en cuenta en cada caso los parámetros adecuados.

Bibliografía

- Alberto Mejía. (2022, August 30). *Gestión de Incentivos Tributarios Ambientales. Preguntas Frecuentes*. Gestión de Incentivos Tributarios Normatividad Ambiental Tecnología y Medio Ambiente. <https://ambientalmente.com/incentivos-tributarios-ambientales-preguntas-frecuentes/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20un%20incentivo%20tributario,%2C%20combustible%2C%20materias%20primas%2C%20energ%C3%ADa>
- Banco Mundial. (n.d.-a). *Individual Flare Sites - Gas Flaring Volumes (mln m3/yr)*.
- Banco Mundial. (n.d.-b). *Why is Gas Flared?* Retrieved January 22, 2024, from <https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction/gas-flaring-explained>
- Banco Mundial. (2022, May 5). *Avances en la reducción de la quema de gas en el mundo se estancan en la última década*. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2022/05/04/a-decade-of-stalled-progress-on-reducing-global-gas-flaring#:~:text=Los%20datos%20satelitales%20compilados%20y,de%20prospecci%C3%B3n%20y%20extracci%C3%B3n%20de>
- Blue Ocean Corporation. (n.d.). *Supply Chain Management in Oil & Gas industry*. Retrieved January 22, 2024, from <https://www.blueoceanacademy.com/supply-chain-management-in-oil-gas-industry/#:~:text=Supply%20chain%20management%20in%20the,the%20oil%20and%20gas%20sector>.
- Bnamericas. (2022a, March 28). *Colombian spot market power prices soar*. <https://www.bnamericas.com/en/news/colombian-spot-market-power-prices-soar>

- Bnamericas. (2022b, August 26). *Colombian spot energy prices rise amid expanding free market*. <https://www.bnamericas.com/en/news/colombian-spot-energy-prices-rise-amid-expanding-free-market>
- Calderón, A. J., & Pekney, N. J. (2020). Optimization of enhanced oil recovery operations in unconventional reservoirs. *Applied Energy*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114072>
- Comunicaciones Ambientalmente. (2021, October 21). *Gestión de Incentivos Tributarios en Materia Ambiental. Boletín # 3. Gestión de Incentivos Tributarios*. <https://ambientalmente.com/incentivos-tributarios-en-materia-ambiental-boletin-3/>
- Comunicaciones Ambientalmente. (2022, November 23). *Entérate sobre los beneficios que las empresas pueden obtener por mitigar el impacto que están generando sobre el planeta. Gestión de Incentivos Tributarios Sostenibilidad*. <https://ambientalmente.com/incentivos-tributarios-en-materia-ambiental-boletin-3-2/>
- Deloitte. (2020). *Beneficios y Tendencias de la Cadena de Suministro Optimizada*.
- Dim, C. (2004). *The importance of mathematical modelling*.
- Econometría SA. (2021). *INSTRUMENTOS ECONÓMICOS Y FINANCIEROS DE LA ESTRATEGIA CLIMÁTICA DE LARGO PLAZO DE COLOMBIA PARA CUMPLIR CON EL ACUERDO DE PARÍS E2050*.
- EIA. (2023). *Weekly Retail Gasoline and Diesel Prices*. https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_gnd_a_EPD2DXL0_pte_dpgal_a.htm
- EITI: Extractive Industries Transparency Initiative. (2017). *Perfiles-Gas*. <https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti-old/informe-2016/perfiles-hidrocarburos/perfiles-gas/>

- Elvidge, C. D., Zhizhin, M., Hsu, F. C., & Baugh, K. E. (2013). VIIRS nightfire: Satellite pyrometry at night. *Remote Sensing*, 5(9), 4423–4449. <https://doi.org/10.3390/rs5094423>
- Energy5 Your Way. (2023, December 5). *Explorando las consecuencias financieras de la quema y venteo en las actividades de gas natural*. <https://energy5.com/es/la-economia-de-la-quema-y-venteo-en-las-operaciones-de-gas-natural>
- ENVERUS. (2021, July 26). *Why is Flaring Necessary?* <https://www.enverus.com/blog/natural-gas-flaring/>
- Esri. (n.d.). *ArcGIS®*. Retrieved July 1, 2022, from <http://www.esri.com/>
- GabriellAHackebeill, M., CarllDLairdd, W., JohnnDSiirolaa, B., & DaviddLWoodruff, J.-P. (2021). *Springer Optimization and Its Applications 67 Pyomo-Optimization Modeling in Python Third Edition* (Springer, Ed.; Third Edition, Vol. 67). <http://www.springer.com/series/7393>
- Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR). (n.d.). *World Bank*. Gas Flaring Explained- What Is Gas Flaring? Retrieved January 13, 2023, from <https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction/gas-flaring-explained>
- Guerra, O. J., Calderón, A. J., Papageorgiou, L. G., & Reklaitis, G. V. (2018). *Integrated Shale Gas Supply Chain Design and Water Management under Uncertainty*.
- Guerra, O. J., Calderón, A. J., Papageorgiou, L. G., & Reklaitis, G. V. (2019). Integrated shale gas supply chain design and water management under uncertainty. *AIChE Journal*, 65(3), 924–936. <https://doi.org/10.1002/aic.16476>
- Gurobi Optimization, L. (2023). *Gurobi Optimizer Reference Manual* (10.0.1). <https://www.gurobi.com>

H. Carl Bauman. (n.d.). *Cost of Starting Up the Chemical Process Plant* (3rd ed., Vol. 52, pp. 51A-52A). Industrial & Engineering Chemistry.

Hart, W. E., Watson, J. P., & Woodruff, D. L. (2011). Pyomo: Modeling and solving mathematical programs in Python. *Mathematical Programming Computation*, 3(3), 219–260. <https://doi.org/10.1007/s12532-011-0026-8>

Holly Young. (2022, August 31). *¿Cuál es el costo ambiental de quemar gas?*
<https://www.dw.com/es/cu%C3%A1-es-el-costo-ambiental-de-quemar-gas/a-62987063>

Iberdrola. (n.d.). *Principios y acciones regulatorias de la descarbonización energética que contribuyen a un marco sostenible y eficiente para combatir el cambio climático*. Retrieved October 22, 2023, from <https://www.iberdrola.com/conocenos/descarbonizacion-economia-principios-acciones-regulacion>

Kucherenko S, Z. O. (n.d.). *SobolGSA Software 2017*. Retrieved August 1, 2023, from <http://www.imperial.ac.uk/process-systems-engineering/research/free-software/sobolgsasoftware>.

Laura, N., Delgado, R., Fundacion, U., De, A., Facultad De Educacion Permanente, Y., Avanzada Especializacion, E. N., Gestion, A., & Bogota, D. C. (2018). *ALTERNATIVAS DE REDUCCIÓN DE QUEMA Y VENDEO DE GAS ASOCIADO EN LA INDUSTRIA PETROLERA*.

Liderazgo, de. (2020). *Metas Ambientales, Sociales, de Gobernanza y Tecnología (TESG)*.

Lisitsa, S., Levina, A., & Lepekhin, A. (n.d.). *Supply-chain management in the oil industry*.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/2019>

Mikheev, A. V, & Potanina, Y. M. (2019a). Technical-economic evaluation of medium-power gas turbine plant with air bottoming cycle. *Energy Systems Research*.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/20191140>

Mikheev, A. V, & Potanina, Y. M. (2019b). *Technical-economic evaluation of medium-power gas turbine plant with air bottoming cycle*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20191140>

Ministerio de Ambiente. (n.d.). *Los Instrumentos Tributarios Ambientales*. Retrieved October 1, 2023, from <https://beneficios->

[tributarios.minambiente.gov.co/#:~:text=Beneficios%20Tributarios%20por%20Inversiones%20en%20Medio%20Ambiente&text=Minimizar%20los%20da%C3%B1os%20ambientales%20causados,renovabilidad%20de%20los%20recursos%20ambientales](https://beneficios-tributarios.minambiente.gov.co/#:~:text=Beneficios%20Tributarios%20por%20Inversiones%20en%20Medio%20Ambiente&text=Minimizar%20los%20da%C3%B1os%20ambientales%20causados,renovabilidad%20de%20los%20recursos%20ambientales).

Ministerio de Transporte. (n.d.-a). *SiceTAC*.

Ministerio de Transporte. (n.d.-b). *SiceTac*. Retrieved January 15, 2023, from

<https://plc.mintransporte.gov.co/Runtime/empresa/ctl/SiceTAC/mid/417>

Mora, D. (2018). *Universidad Autónoma Metropolitana*.

North Dakota Commission. (2014). *North Dakota Industrial Commission Order 24665*.

NRDC. (2011, December). *Why Liquid Coal Is Not a Viable Option to Move America Beyond*

Oil. https://www.nrdc.org/sites/default/files/liquidcoalnotviable_fs.pdf

Olga Lucía Bedoya Mesa. (2022, August 30). *Incentivos Tributarios Ambientales*.

Osama Abdelaziem. (2023, September 23). *Basic Principles of Supply Chain in Oil Industry*.

<https://www.linkedin.com/pulse/basic-principles-supply-chain-oil-industry-osama-abdelaziem/>

Sáchica, J. A. (2020). Methodology for the optimization of energy consumption under financial efficiency analysis with a high impact on reducing GHG emissions. Successful application

case in the largest field in Colombia. *Fuentes El Reventon Energetico*, 18(2), 107–122.

<https://doi.org/10.18273/REVFUE.V18N2-2020007>

Stanley Too-chukwu, E., Nkemakolam Chinedu, I., Ubanozie Julian, O., Anthony, K., Nnaemeka Princewill, O., Jude Emeka, O., & Boniface, O. (2019). Economics of Gas-to-Liquids (GTL) Plants. *Petroleum Science and Engineering*, 3(2), 85.

<https://doi.org/10.11648/j.pse.20190302.17>

Tan, S. H., & Barton, P. I. (2015). Optimal dynamic allocation of mobile plants to monetize associated or stranded natural gas, Part I: Bakken shale play case study. *Energy*, 93, 1581–1594. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.043>

Tan, S. H., & Barton, P. I. (2016). Optimal dynamic allocation of mobile plants to monetize associated or stranded natural gas, part II: Dealing with uncertainty. *Energy*, 96, 461–467. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.069>

The Oxford Institute for Energy Studies. (2020). *A Comparative History of Oil and Gas Markets and Prices: is 2020 just an extreme cyclical event or an acceleration of the energy transition?*

UPME. (n.d.). *FECOC 2016*. Retrieved October 22, 2023, from

http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html

UPME-ANH-Unión Temporal CTL. (2007). *RESUMEN EJECUTIVO ANÁLISIS Y EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS A PARTIR DE CARBÓN PARA EL CASO COLOMBIANO*.

U.S. Energy Information Administration. (n.d.). *Gasoline and Diesel Fuel Update*. 2022.

Velez Diez, J. A. (2021). *ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA EL APROVECHAMIENTO ECONÓMICO DE UN CAMPO MENOR DE GAS NATURAL EN COLOMBIA POR PARTE DE EFIGAS S.A. E.S.P.*

Vygon Consulting. (2021). *Report on Small-scale Technologies for Utilization of Associated Gas*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/305891644478108245/pdf/Report-on-Small-scale-Technologies-for-Utilization-of-Associated-Gas.pdf>

Wood, D. A., Nwaoha, C., & Towler, B. F. (2012). Gas-to-liquids (GTL): A review of an industry offering several routes for monetizing natural gas. In *Journal of Natural Gas Science and Engineering* (Vol. 9, pp. 196–208). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2012.07.001>

Yasseri, S. F., & Bahai, H. (2018). System Readiness Level Estimation of Oil and Gas Production Systems. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COASTAL & OFFSHORE ENGINEERING*, 3, 31–44. http://ijcoe.org/browse.php?a_code=A-10-121-3&sid=1&slc_lang=en

Apéndices

Apéndice A. Nomenclatura

Índices

i, i''	teas
p	Tecnologías
c	Capacidad
t	Periodos de tiempo

Sets

I	Set de teas
P	Set de tecnologías
C	Set de capacidades
t	Set de periodos
n	Set de conexiones permitidas entre teas

Parámetros

α	Número de meses que hay en cada periodo del horizonte de planeación. [mes]
$capmax_{p,c}$	Capacidad máxima de procesamiento [MMSCFD]
$CarbonTax_t$	Impuesto por emisiones de carbono [USD/ton CO ₂]
$CostP_{p,c}$	Costo de compra de la planta [USD]
$d_{i,i'}$	Distancia entre las teas [km]
$discount$	Descuento aplicado a los gastos capitales [%]
$dismantle_{p,c}$	Costo por desmontar la planta [USD]
$EmFlaring$	Emisiones de CO ₂ debido a la quema de gas.
$gastea_{i,t}$	Flujo de gas de la tea [MMSCF mes]
$mincap_p$	Capacidad mínima de la planta [%]
$n_{i,i'}$	Conexión entre teas.

$plantinit_{i,p,c,t=1}$	Número de plantas disponibles al inicio del proyecto.
$Price_{p,t}$	Precio de venta de los productos. [USD]
$PriceBuy_{p,c}$	Precio de compra de las plantas. [USD]
$setupc_{p,c}$	Costo de instalación de la planta. [USD]
$target_t$	Objetivo de reducción de quema periodo a periodo [%]
$tcost_{p,c}$	Costo de transporte de la planta [USD]
tr	Impuesto a la renta [%]
$tt_{t,t}$	Conexión para hallar la depreciación acelerada.
vat	Impuesto de Valor Agregado decretado por el gobierno. [%]
$yield_p$	Rendimiento de las tecnologías.

Variables positivas continuas

$CAPACITY_{i,p,c,t}$	Capacidad de las tecnologías
$CAPEX_t$	Costos asociados a las compras [USD]
$CARBONCOST_t$	Costos asociados a las emisiones [USD]
$OPEX_t$	Costos operativos [USD]
$PROCESSED_{i,p,c,t}$	Flujo de gas procesado [MMSCF].
$TGASFLOW_{i,t}$	Flujo total de gas procesado [MMSCF]
$FLARING_t$	Flujo de gas de tea [MMSCF]
$PRODUCTS_{i,p,t}$	Flujo de productos.

Variables libres continuas

$maxNPV$	Valor Presente Neto [USD]
$ADEP_{t,t'}$	Depreciación acelerada [USD]
$GASPENALTY_{i,t}$	Flujo de gas penalizado [MMSCF]
$GASNOPENALTY_{i,t}$	Flujo de gas sin penalizar [MMSCF]
$INCOME$	Ingresos [USD]
$CASHFLOW_t$	Flujo de caja antes de impuestos [USD]
PC_t	Costos de procesamiento [USD]

$PROFIT_t$	Beneficios obtenidos [UDS]
RC_t	Costos por relocalización [USD]
$SVALUE$	Valor de salvamento [USD]
$TAXES$	Impuestos [USD]
$TAXBENEFITS$	Beneficios tributarios [USD]

Variables Binarias

$BUY_{i,p,c,t}$ Un valor de 1 en una tea i en un periodo t , significa que se requiere la compra de una tecnología p con una capacidad c para procesar el gas de tea, en otro caso el valor es 0.

$M_{i',i,p,c,t}$ Si el gas de una tea es insuficiente para ser procesado u otra tea generaría más ganancias la variable toma el valor de 1 que corresponde a que la planta está disponible para moverse a otra tea i' , en otro caso el valor es 0.

Variable Entera

$PLANT_{i,p,c,t}$ La cantidad máxima de plantas que se pueden adquirir por periodo no puede ser superior a 3.

Apéndice B. Información técnica de las tecnologías

Empresa	Tecnología y condiciones de operación	Tamaño y Costo	Requerimientos operacionales adicionales	Modelo de negocio	Experiencia a la fecha
Aggreko	Turbinas	Rango: 36-10 kW	Dependen de cada proyecto.	Alquiler simple disponible. Modelo de prestación de servicios llave en mano con todos los elementos del proyecto gestionados por Aggreko.	Desde 2008. En África, Asia, América y Europa continúa creciendo en el portafolio.
	Q: 9.5 MCF (270m ³) /MW Pi: 5 -6 bar H ₂ S: hasta 10 ppm	Modular y escalable, opción de container. Contenedores de 20 pies.			
APR Energy: TM2500 Mobile Gas	Turbinas	TM2500 + ISO rango es 26-30 MW		Acuerdos de compra de energía, opciones de BOOT, Soluciones IPP.	APR cuenta con una flota de más de 2000MW y ha realizado más de 3GW en 30 países.
	Configuración multi combustibles (Diesel, gas, LPG, nafta)	Las soluciones de turbina son escalables y modulares, y van de 20 a 500 MW			
Capstone Turbine Corporation	Turbina	Tamaños: 30, 65, 200, 600, 800, 1000 kW	Aire y combustible libre de líquido y filtrado para las partículas necesarios para la aplicación fuera de la red	Venta a través de la red de distribuidores internacionales. Opciones de arrendamiento y financiación	Operaciones con gas flaring húmedo en Alemania, USA, y Rusia. En Rusia opera con gas flaring de hasta 3.5% de H ₂ S
	Q: 10 MCFD/ 30KW 20 MCFD/ 65 KW 54 MCFD/ 200 KW Pi: 55-80 psig	Las unidades son escalables y modulares. Todos los modelos pueden ser dispuestos en un trailer o container			

Empresa	Tecnología y condiciones de operación	Tamaño y Costo	Requerimientos operacionales adicionales	Modelo de negocio	Experiencia a la fecha
	Hasta 70% CO ₂ , 22% N ₂ , 30000 ppm H ₂ S Multi combustibles son posibles usando diesel, propano y keroseno	Costo entre 1000-1700 USD/ kW dependiendo del modelo, configuración y opciones			
GE: Waukesha and Jenbacher	Turbinas Pi: 60-115 psi. +- 10%	Motores Waukesha 200kW- 3.7MW Motores Jenbacher 250KW- 9.5MW	Pretratamiento del gas.	Venta a través de distribuidores autorizados y proveedores de servicios	Aprox 30 años de experiencia en áreas remotas, tres aplicaciones usando gas asociado en el medio oeste
		Las unidades son escalables, modulares y dispuestas en container Tamaño practico 200KW- 2.5MW			
LPP Combustion LLC	turbinas o motores	Unidades de tamaños desde 30kW hasta 300 MW		Venta y alquiler	Unidad comercial de 30 kW. Plataforma de 65kW en Canadá.
	Q: 186 -280 MCFD/ MW				

Empresa	Tecnología y condiciones de operación	Tamaño y Costo	Requerimientos operacionales adicionales	Modelo de negocio	Experiencia a la fecha
	Multi combustibles simultáneos y con cambio rápido	Container hasta 30 MW Costo 1200 USD/kW para sistemas debajo de 200 kW y 150-300 USD para multi MW			
MESA Natural Gas Solutions LLC	Turbinas Pi: 6-90 psi No requiere preprocesamiento para <100 ppm H2S	Relocalizables: 70-350 kW, 480 V Estacionarias de reserva: 300-400kW 480 V Estacionarias fijas 70-350kW 480 V		Venta, alquiler o empresa conjunta	Plataforma de 450 MW Mas de 20 millones de horas de operación. 32 MW de plataformas comerciales e industriales micro, instaladas desde 2018
	Cambio automático a fuente secundaria. AG, propano, NGC, GPL (800-2500 BTU/SCF)	Eficiencia conversión: 0.25 MCFD /kW			
Moser Energy System	Turbinas Q: 10-250 MCFD Pi: 5-50 psi H ₂ S: ≥ 200 ppm	Tamaños: 70, 125, 170, 225, 350 1000kW	minimizar los líquidos en el gas de soldadura	Venta, alquiler o empresa conjunta	Más de 10 millones de horas de operación usando gas asociado
		Las unidades son encapsuladas en tráiler o plataforma.			

Empresa	Tecnología y condiciones de operación	Tamaño y Costo	Requerimientos operacionales adicionales	Modelo de negocio	Experiencia a la fecha
	Multi combustibles usando gas natural y propano		Aislar los conductos de gas por encima del suelo, si las operaciones se realizan en climas fríos		
OPRA turbinas: QP16 Gas Turbine	Turbinas	Tamaños: 1-10 MW	Energía auxiliar para el arranque en negro	venta, arriendo, construir-poseer-operar (BOO)/construir-poseer-operar-transferir (BOOT)	28 turbinas en alta mar y en campos de gas en Rusia, Brasil y Mar Norte Más de 1 millón de horas operativas usando gas asociado
	Q: 332MCFD/MW calefacción: 5-120 MJ/kg Pi >145 psi H ₂ S <4% vol	Las turbinas son escalables y modulares, configuradas en container de 20ft			
	Multicombustible mediante cambio rápido	Costo 900-1000USD/ kW			
Turboden- Mitsubishi Heavy Industries Group	Turbina	Tamaños: 200- 20000 kW	Se requiere enfriador en caso de modo CHP (combine heat and power)	Venta, renta (a través de un socio con MHI)	Una planta comercial (1.8MW) opera con gas flaring en Osa Perm, Rusia desde 2015
	Q: 1.5 - 20 MMSCFD (respectivamente 1-20MW) Pi > 1.5 psi	Escalables y modulares, configuradas en container. Montado en camión hasta 300kW Costo 4000-4500UDS/kW por 300-600kW 2800-3300USD/kW por 1-5MW			
	Maneja varias composiciones y flujos de gas	1700-2200 USD/kW por >5MW			

Empresa	Tecnología y condiciones de operación	Tamaño y Costo	Requerimientos operacionales adicionales	Modelo de negocio	Experiencia a la fecha
	multi combustible simultaneo mezcla de gas flaring con gas natural y otros combustibles				
Unicom Power LTD and Green Recycling Technologies	Turbinas	Tamaño: 200-500kW		Venta	
	Q: 63- 296MSCFD Pi: 0.4 psi Eficiencia eléctrica 30-35% H ₂ S<200 ppm	Modulares y escalables (hasta 20 x 500kW) y dispuestas en container.			
	Multi combustible se realiza simultáneamente con diéselo gasolina	Costo 2.5 Millones/MW			
Wrtisla SG, LG and GD Flexible power plants	Motores de gas	Las unidades son modulares y escalables.	Contactar compañía para otros requisitos operacionales	Suministro de equipo	Una combinación de 60 GW entregados a la red mundial, incluyendo todo tipo de plantas Plantas operando con gas asociado/
	CO ₂ +N ₂ :60% Salida de planta: 10-400MW Eficiencia 45%	Contactar compañía para tamaño de modulo estándar			
		Contactar compañía para costos			

Empresa	Tecnología y condiciones de operación	Tamaño y Costo	Requerimientos operacionales adicionales	Modelo de negocio	Experiencia a la fecha
	Multicombustible sin interrupción (gas natural, diesel, HFO, biocombustibles, crudo)				flaring gas en los últimos 15 años
Compact GTL	GTL	Tamaños: 1000 a 15000 barriles de crudo/diésel por día.	La planta puede ser diseñada en una sola base	licencia, diseño, construcción, propiedad y explotación de capacidades más pequeñas	Más de 8 años de pruebas en la planta piloto de CGTL de CGTL en Wilton, Reino Unido
	Q: 10-15 MMSCFD Producto: crudo sintético o diesel	los reactores FT son modularizados, en módulos de container de 40 ft			
Emerging Fuels Technology	GTL Q: Desde 5MMSCFD	Mini: 500 BPD FOB <50\$ min Micro: 25 BPD. FOB < 4 US min M50(50 BPD) Y M250 (250 BPD)	Suministro de energía y agua. Tratamiento de aguas residuales.	Licencia, construcción y venta	Décadas de experiencia en plantas GTL a gran escala. Licencia de la tecnología GTL para Juniper GTL, y Fulcrum y Red Rock Biofuels.

Empresa	Tecnología y condiciones de operación	Tamaño y Costo	Requerimientos operacionales adicionales	Modelo de negocio	Experiencia a la fecha
Gas Techno	GTL	Tamaños:300 a 10000 MSCFD.	Energía y oxígeno.	Diseñar, construir y operar las plantas, comprando el gas de alimentación del operador del campo	Noviembre 2016 inauguración primera planta comercial- Gas Techno® Mini-GTL® en Michigan, Estados Unidos. Unidad de 300 Mscfd se utilizó con gas de combustión de Bakken en 2018
	Productos: metanol, etanol y formaldehido	La planta de 300 MSCFD es modular e instalada en container de 40 ' El costo por 300 MSCFD es 1300 US/TPA. Costo por 5000 MSCD es 450US/TPA.		Empresas conjuntas con productores/operadores, como acuerdos de peaje con productores/receptores.	
GreyRock	GTL	M 50: utiliza 500MSCFD	Se necesitaría energía para las operaciones.	Licencias. Socios de Greyrock en JV (Advantage Midstream en Norteamérica, AngloAmerican en África y Perseus en México) construirán/poseerán/operarán plantas	Tecnología 30 bpd en Toledo, Ohio en 2011-2014. Una Greyrock M-50 en Colorado. M-500, modificado
		Costos: 65.000 US/ bbl hasta 100.000 US/ bbl			

Empresa	Tecnología y condiciones de operación	Tamaño y Costo	Requerimientos operacionales adicionales	Modelo de negocio	Experiencia a la fecha
					por Expander Energy Inc, está en construcción en Alberta, Canadá
Bluescape Clean Fuels	GTL Productos: gasolina, metanol, o syncrude.	Unidades modulares y escalables Tamaños: 100 bbl/día hasta 5000 bbl/día	Requiere servicios públicos estándar.	Estructuras flexibles, desde el suministro del sistema hasta la construcción/propiedad/operación	Planta de demostración en funcionamiento > 11.000 horas de funcionamiento
Calvert Energy	GTL	Modular y escalables. Modulo: 3m X 6mX 6m (22 ton)	Agua limpia es un subproducto	Venta, construcción, propio y con gas de compra. Calvert diseña y manufactura todos los sistemas en Europa	En Argentina planta de 500 b/d desde mediados de 2016. Planta completa de GTL en operación en Dakota USA (25 b/d) desde 2017
	Pi: 2-30 bar		Suministro de energía: 1 MW por 150 b/d de producto		
	Gas puede contener H ₂ S, N ₂ Y CO ₂	Se producen 100 bbl diesel, 1 bbl de cera, 2 bbl de agua limpia por MMSCF de gas alimentado Costo EPC aprox 45M US por una planta de 10MMSCFD	Calvert puede proveer removedor de H ₂ S y CO ₂		
Velocys	GTL	Tamaños: 1400 a 5000 BPD	Suministro de energía, agua, y tratamiento de aguas de residuo	Licencia o venta del reactor FT y catalizador FT	Planta GTL Envia Energys en Oklahoma City , 26000 horas de testeo y

Empresa	Tecnología y condiciones de operación	Tamaño y Costo	Requerimientos operacionales adicionales	Modelo de negocio	Experiencia a la fecha
	Eficiencia conversión > 91%	La isla FT es modularizada, escalable y dispuesta en container			demostración incluida un test en Petrobras. 1.3 millones de horas de operación de catálisis en laboratorio
Primus Green Energy	GTL	Tamaños: 5MMSCFD (500 bbd gasolina o 160 MTd metanol).	Agua fría, agua de proceso, electricidad y utilidades estándar.	ventas, licencia, peaje	Proyectos de metanol de 160 MTd en Norte América programado para el 2018. Octubre de 2013, demostración de planta de 7bpd (100.000 galones año) usando una pimpina de gas.
	Productos: metanol y gasolina	20 MMSCFD (2000bbd gasolina o 60 MTd/ metanol)			
	H ₂ S: 10 ppm.	Los sistemas STG+ son modulares y escalables.			
Verdis Fuels	GTL	Tamaños: 500 bbl/d		Sociedad	2006-2008 Prototipo de 25MSCFD en Oklahoma City

Empresa	Tecnología y condiciones de operación	Tamaño y Costo	Requerimientos operacionales adicionales	Modelo de negocio	Experiencia a la fecha
	Q: <2.5 MMSCFD Pi: 150-350 psig T; 185-240 °C HCE: 7500-9300 MCF metano/ bbl Conversión > 90%	Plantas, modulares y móviles.			Patentes en 25 países, incluidos Rusia, USA, Nigeria e Iraq
BC TL	GTL				

Empresa	Tecnología y condiciones de operación	Tamaño y Costo	Requerimientos operacionales adicionales	Modelo de negocio	Experiencia a la fecha
	<p>Q: 0.2-2 MMSCFD Conversión > 70%</p> <p>Productos: Gasolina, Diesel, Jet fuel, Metanol, etanol, Cera, Di Metil Éter, Mezcla de alcoholes.</p>	<p>Tamaños:20,50,100,200 BPD.</p> <p>Plantas compactas, modulares y móviles.</p>			<p>2017 finaliza de manera exitosa pruebas de planta piloto en Wisconsin.</p>

Apéndice C. Estimación de costos de transporte

The screenshot shows the SiceTac application interface. At the top, there is a navigation bar with the logo of the Ministerio de Transporte and links to INICIO, RNDC, SICE TAC, ESTADÍSTICAS, ALIANZAS, CORREDORES, and PUBLICACIONES. Below this is a green header with the text 'Costos Eficientes'. The main area contains a form with the following fields:

- Cuál es la configuración de su vehículo?: Tractocamión tres ejes - Tractomula con semiremolque de do: (dropdown)
- Qué tipo de carga va a transportar?: Contenedor (dropdown)
- Qué tipo de unidad de transporte va a emplear?: TRAYLER (dropdown)
- Donde se origina el viaje?: BARRANCABERMEJA (dropdown) with a value of 68081000.
- Cual es el destino?: CÚCUTA (dropdown) with a value of 54001000.
- Cual vía va a utilizar para el viaje?: BARRANCABERMEJA _ CÚCUTA (dropdown)
- Horas acordadas para la actividad del cargue?: 4 (input field)
- Horas acordadas para la actividad del descargue?: 4 (input field)
- Horas de espera en el cargue?: 2 (input field)
- Horas de espera en el descargue?: 2 (input field)
- Cuál es el periodo?: 202301 (input field)
- Cuánto es 59 + 21: 80 (input field)

A green 'CALCULAR' button is located at the bottom right of the form.

Figura 20. Aplicación SiceTac para estimar costos de transporte

Con la aplicación y variando las rutas se estimaron 17 rutas aleatorias de diferentes distancias, entre 20 y 1000 kilómetros de distancia quienes serían los puntos para realizar la regresión (Ministerio de Transporte, n.d.-b).

Ciudades	Distancia km	precio USD/ km
Villavicencio -San Martin	64	3.61
Villavicencio -Puerto López	86	2.69
Villavicencio-Tauramena	187	1.6
Villavicencio-Yopal	252	1.34
Barranquilla- Aguachica, Cesar	409	1.43
Barranquilla- Aguazul	1028	1.11
Barranquilla- Armenia	968	1.25
Barranquilla-Barranca	596	1.39
Barranquilla-Bochalema- La DONJUANA NS	686	1.22
Barranquilla- Bogota	984	1.12
Barranquilla- Bucaramanga	569	1.3
Barranquilla- Cartagena	112	2.88
Barranquilla- Santamarta	84	2.99
Bucaramanga-Barrancabermeja	109	2.68
Bogota- Cajicá	41	4.85
Bogota- Cota	23	8.05

Ciudades	Distancia km	precio USD/ km
Bogota- Zipaquirá	57	3.69

Con los datos anteriores y haciendo uso del software Origin (Versión Gratuita licencia educativa), se realizó la regresión logarítmica con un coeficiente de determinación de 1 y a partir de esta función se estimaron los costos de transporte para el caso estudiado.

Apéndice D. Conexión entre teas

En la siguiente matriz, se representa las teas que están conectadas entre sí con un 1.

	i1	i2	i3	i4	i5	i6	i7	i8	i9	i10	i11	i12	i13	i14	i15	i16	i17	i18	i19	i20	i21	i22	i23	i24	i25	i26	i27	i28	i29	i30	i31	i32	i33	i34	i35						
i1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0				
i2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0				
i3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0				
i4	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0				
i5	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0			
i6	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1				
i7	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0				
i8	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1				
i9	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1			
i10	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0				
i11	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0				
i12	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
i13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0				
i14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
i15	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0			
i16	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0			
i17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
i18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0			
i19	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1			
i20	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1			
i21	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1		
i22	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		
i23	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1		
i24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0		
i25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
i26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
i27	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	
i28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
i29	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	
i30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
i31	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
i32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
i33	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
i34	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
i35	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	

