

**PROPUESTA DE UN DISEÑO DE SISTEMA DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE GAS
NATURAL DOMÉSTICO PARA LA VEREDA SAN ROQUE Y ZONAS ALEDAÑAS AL
CAMPO CERRO GORDO, EN EL DEPARTAMENTO DEL NORTE DE SANTANDER**

**Proyecto de grado para optar por el título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**GABRIELA CORTÉS POMAR
MARÍA PAULA QUIMBAYO CASALLAS**

Director:

**Benjamín Alexis Garavito Linares
Ingeniero de Petróleos**

Codirector:

**Adriangela Chiquinquirá Romero Sánchez
Ingeniero de Petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Edinson Jiménez

Sebastián Gómez Alba

Bogotá, D.C., Agosto 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigación

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. Juan Carlos Rodríguez Esparza

DEDICATORIA

Quiero agradecer a Dios por permitir culminar este proyecto junto a mi compañera y amiga María Paula, que orgullo terminar esta etapa junto a ti. Se lo dedico a mis padres que por su gran apoyo y amor incondicional he logrado llegar hasta acá y a ti hermano por ser mi compañía para todo. Gracias familia, este logro es de ustedes.

Gabriela Cortés Pomar

Principalmente agradezco a Dios por estar siempre presente en cada paso que doy, a mi familia que con su amor incondicional me han acompañado durante todo el transcurso de esta carrera dándome la suficiente motivación e impulso para culminar con éxito mis estudios universitarios y por último pero no menos importante a mi compañera y amiga Gabriela con quien culmino esta etapa, por el buen trabajo en equipo realizado y por la confianza que tuvo en mí.

María Paula Quimbayo Casallas

AGRADECIMIENTO

Principalmente, agradecemos al la empresa Wattle Petroleum Company por la oportunidad y confianza que depositaron en nosotros para la elaboración del proyecto de grado, brindando su apoyo, herramientas e información para el desarrollo y culminación de objetivos planteados en el presente documento.

A la fundación Xúa Energy y al Ingeniero Benjamín Garavito por la confianza que depositaron en nosotras y por el acompañamiento e información proporcionada durante la realización del documento.

A nuestra codirectora Ingeniera de Petróleos Adriangela Romero, quien atendió amablemente las consultas e inquietudes, y que con su apoyo y amplio conocimiento en el tema nos realizó las debidas recomendaciones técnicas que consolidaron nuestro proyecto de grado.

TABLA DE CONTENIDO

	<i>Pág</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>10</i>
<i>1. MARCO TEÓRICO</i>	<i>11</i>
<i>1.1 Generalidades del campo cerro gordo</i>	<i>11</i>
<i>1.1.1 Sistema Petrolífero</i>	<i>12</i>
<i>1.1.2 Historial de producción</i>	<i>14</i>
<i>1.1.3 Facilidades de superficie</i>	<i>15</i>
<i>1.2 Generalidades del gas natural</i>	<i>17</i>
<i>1.2.1 Técnica del gas natural comprimido (Gasoducto virtual)</i>	<i>18</i>
<i>1.2.2 Especificaciones de calidad para transporte por tuberías en Colombia</i>	<i>20</i>
<i>1.2.3 Normativas y Criterios para el diseño eficiente de redes</i>	<i>21</i>
<i>1.2.4 Análisis composicional del gas extraído en el campo Cerro Gordo</i>	<i>22</i>
<i>1.3 Generalidades de la Vereda San Roque</i>	<i>24</i>
<i>2 METODOLOGÍA Y DATOS</i>	<i>28</i>
<i>2.1 Estudio de mercado</i>	<i>29</i>
<i>2.2 Demanda de gas natural en la zona</i>	<i>30</i>
<i>2.3 Caracterización del sistema para abastecer de gas combustible a San Roque</i>	<i>31</i>
<i>2.3.1 Transporte del gas mediante gasoducto virtual</i>	<i>31</i>
<i>2.3.2 Diseño de la red de distribución de gas</i>	<i>32</i>
<i>2.4 Estudio Financiero</i>	<i>38</i>
<i>3 RESULTADOS Y ANÁLISIS</i>	<i>41</i>
<i>3.1 Estudio de mercado</i>	<i>41</i>
<i>3.2 Estimación de la demanda de GN</i>	<i>44</i>
<i>3.3 Diseño del sistema de gasoducto virtual</i>	<i>45</i>
<i>3.4 Diseño de la red de distribución de gas natural</i>	<i>50</i>
<i>3.4.1 Trazado, características de tubería y accesorios</i>	<i>50</i>
<i>3.4.2 Parámetros iniciales</i>	<i>53</i>
<i>3.4.3 Modelamiento en Aspen HYSYS</i>	<i>54</i>
<i>3.5 Análisis financiero de la propuesta</i>	<i>70</i>
<i>3.5.1 Costos de inversión</i>	<i>70</i>
<i>3.5.2 Flujo de Caja</i>	<i>73</i>
<i>3.5.3 Indicadores VPN y TIR</i>	<i>76</i>
<i>4 CONCLUSIONES</i>	<i>78</i>

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Composición típica del gas natural</i>	17
<i>Tabla 2. Especificaciones para transporte de gas natural por tuberías</i>	20
<i>Tabla 3. Análisis composicional del gas extraído</i>	22
<i>Tabla 4. Propiedades del Gas</i>	24
<i>Tabla 5. Ficha técnica estudio de mercado</i>	29
<i>Tabla 6. Estudio de mercado zona rural</i>	41
<i>Tabla 7. Estudio de mercado zona urbana</i>	42
<i>Tabla 8. Demanda de gas natural</i>	45
<i>Tabla 9. Diseño del sistema de transporte de GNC</i>	46
<i>Tabla 10. Datos de las corrientes de materia</i>	48
<i>Tabla 11. Datos de los reguladores</i>	49
<i>Tabla 12. Datos de los calentadores</i>	49
<i>Tabla 13. Características de tubería del Centro Poblado de San Roque</i>	51
<i>Tabla 14. Características de tubería de zona rural de San Roque</i>	51
<i>Tabla 15. Válvulas y accesorios del tendido de red</i>	52
<i>Tabla 16. Especificaciones del fluido GN</i>	53
<i>Tabla 17. Especificaciones termodinámicas de entrada para la línea troncal y rural</i>	53
<i>Tabla 18. Especificaciones para cada tramo de tubería</i>	54
<i>Tabla 19. Resultados de las corrientes de materia en la red de la zona urbana</i>	55
<i>Tabla 20. Resultados de los tramos de tubería de la red de la zona urbana</i>	56
<i>Tabla 21. Profile View de la troncal del centro poblado</i>	57
<i>Tabla 22. Profile View del anillo-1 del centro poblado</i>	59
<i>Tabla 23. Profile View de las acometidas del anillo-1 del centro poblado</i>	60
<i>Tabla 24. Profile View del anillo-2 del centro poblado</i>	62
<i>Tabla 25. Profile View de las acometidas del anillo-2 del centro poblado</i>	63
<i>Tabla 26. Resultados de las corrientes de materia en la red de la zona rural</i>	65
<i>Tabla 27. Resultados de los tramos de tubería de la red de la zona rural</i>	66
<i>Tabla 28. Profile View de la línea rural</i>	67
<i>Tabla 29. Profile View de la línea de acometida rural de San Roque</i>	68
<i>Tabla 30. Inversiones en almacenamiento y transporte del GNC</i>	71
<i>Tabla 31. Inversiones en la descompresión del GNC</i>	72
<i>Tabla 32. Costos materiales y accesorios</i>	72
<i>Tabla 33. Mano de obra e instalación</i>	73
<i>Tabla 34. Ingresos por venta según estrato de viviendas</i>	74
<i>Tabla 35. Ingresos por venta anuales</i>	74
<i>Tabla 36. Compra GNC a la Planta La Florida</i>	74
<i>Tabla 37. Gastos en Transporte y Almacenamiento de GNC</i>	74
<i>Tabla 38. Gastos en Descompresión del GNC</i>	75
<i>Tabla 39. Gastos en transporte por tuberías del GN</i>	75
<i>Tabla 40. Flujo de caja (horizonte de proyección)</i>	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1. Localización geográfica del Campo Cerro Gordo</i>	11
<i>Figura 2. Registro eléctrico del pozo Cerro Gordo-3</i>	13
<i>Figura 3. Perfil de producción mensual del campo cerro gordo</i>	14
<i>Figura 4. Diagrama P&ID de la facilidad de superficie del Campo Cerro Gordo y planta La Florida.</i>	16
<i>Figura 5. Diagrama de distribución de gas natural</i>	18
<i>Figura 6. Ubicación geográfica de la Vereda San Roque</i>	25
<i>Figura 7. Vista satelital Vereda San Roque, Campo Cerro Gordo y Planta La Florida</i>	26
<i>Figura 8. Mapa topográfico Vereda San Roque</i>	27
<i>Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología</i>	28
<i>Figura 10. Consumo medio por región</i>	30
<i>Figura 11. Algoritmo para diseño del sistema de descompresión</i>	32
<i>Figura 12. Esquema general del proceso a seguir en Aspen Hysys</i>	35
<i>Figura 13. Árbol de decisión para selección del model</i>	37
<i>Figura 14. Tendencia de número de habitantes por finca en zona rural</i>	43
<i>Figura 15. Tendencia de número de habitantes por vivienda en zona urbana</i>	43
<i>Figura 16. Recorrido del módulo de GNC por camiones</i>	47
<i>Figura 17. PFD de la Estación de Regulación</i>	48
<i>Figura 18. Diseño de la red de distribución de GN para el Centro Poblado</i>	55
<i>Figura 19. Perfil de Presión y Densidad Másica vs. Longitud de la línea troncal</i>	58
<i>Figura 20. Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud de la troncal</i>	58
<i>Figura 21. Perfil de Presión y Densidad Másica vs. Longitud de anillo-1</i>	59
<i>Figura 22. Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud del anillo-1</i>	60
<i>Figura 23. Perfil de Presión y Densidad Másica vs. Longitud de acometida anillo-1</i>	61
<i>Figura 24. Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud de acometida anillo-1</i>	61
<i>Figura 25. Perfil de Presión y Densidad Másica vs. Longitud de anillo-2</i>	62
<i>Figura 26. Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud de anillo-2</i>	63
<i>Figura 27. Perfil de Presión y Densidad Másica vs. Longitud de acometida anillo-2</i>	64
<i>Figura 28. Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud de acometida anillo-2</i>	64
<i>Figura 29. Diseño de la red de distribución de GN para la zona rural</i>	65
<i>Figura 30. Perfil de Presión y Flujo Másico vs. Longitud de la línea rural</i>	67
<i>Figura 31. Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud de la línea rural</i>	68
<i>Figura 32. Perfil de Presión y Flujo Másico vs. Longitud de la línea acometida rural</i>	69
<i>Figura 33. Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud de línea acometida rural</i>	69
<i>Figura 34. Flujo de caja</i>	76

ABREVIATURAS

CG-1. Campo Cerro Gordo-1

CG-5. Campo Cerro gordo-5

CREG. Comisión de regulación de energía y gas

GNC. Gas Natural Comprimido

GLP. Gas Licuado de Petróleo

MPCS. Millones de pies cúbicos estándar

PEMD. Polietileno de mediana densidad

PE. Polietileno

PSIA. Libras por pulgada cuadrada absoluta

PSIG. Libras por pulgada cuadrada de galga

RSE. Responsabilidad social empresarial

SCF. Standard Cubic Foot

TEG. Trietilenglicol

TIO. Tasa interna de oportunidad

TIR. Tasa interna de retorno

VPN. Valor presente neto

WPC. Wattle Petroleum Company

RESUMEN

A raíz de que los habitantes de San Roque han presentado la necesidad de adquirir el servicio de GN y la empresa Wattle Petroleum quiere reducir la brecha social y fortalecer las relaciones de confianza existentes con la comunidad, en el presente documento se estudia un posible escenario que brinde una solución a la problemática planteada mediante el desarrollo del diseño de una red de distribución de gas natural, el cual consta de un sistema virtual y la posterior red de distribución que satisface el consumo tanto de los habitantes del centro poblado como de la zona rural.

El diseño del sistema virtual consta de tres etapas, la primera es la compresión del GN en la planta La Florida, seguido del transporte desde la planta hasta la cabecera municipal en donde se muestra la ruta del gasoducto virtual realizada en la herramienta ArcGIS, por último, la descompresión en dos etapas, la cual se diseñó en el software AspenHysys, y de donde se obtienen la mayor parte de parámetros iniciales para el inicio del diseño de la red.

Basándonos en las NTC y en los resultados obtenidos, se realizó el trazado de la tubería en la herramienta Autocad y el diseño de la red para la zona poblada y rural en el software AspenHysys, herramienta que nos permitió hacer un análisis completo del sistema planteado, evaluando parámetros como presión, flujos, velocidades, entre otras variables de interés, que ayudaron a establecer la inversión y rentabilidad al determinar el Valor Presente Neto (VPN) y Tasa Interna de Retorno (TIR).

Palabras clave: Gas Natural, Diseño, Distribución de gas, Aspen Hysys, Gas Natural Comprimido, Gasoducto virtual, Compresión, Descompresión, Tendido de tubería, transporte, caída de presión, demanda.

INTRODUCCIÓN

El gas natural es conocido hace miles de años por la humanidad como un subproducto de la explotación del crudo en los campos petroleros, con el pasar del tiempo se ha tomado conciencia del valor de este hidrocarburo y se le ha vinculado activamente con el desarrollo económico y social de cada país. En Colombia, su producción, transporte, distribución y comercialización se remonta a los descubrimientos de los campos del departamento de Santander y a dos grandes reservas en la Guajira [1], que han permitido iniciar las contracciones de gasoductos y líneas de gas para ser utilizadas en la distribución y comercialización a nivel domiciliario en algunas regiones del país, sin embargo, se presentan zonas que no gozan aún del acceso a este servicio que actualmente está considerado en la canasta energética y que se ha venido masificando.

En algunas regiones pequeñas del Norte de Santander todavía no se cuenta con este beneficio, como es el caso de la vereda San Roque y algunas viviendas aledañas al campo Cerro Gordo, las cuales son zonas olvidadas con altos índices de pobreza. Esta zona del Catatumbo se encuentra ubicada aproximadamente a 20km del municipio de Sardinata, siendo una zona de difícil acceso por sus terrenos y con problemas de orden público recurrentes, lo que obliga a los habitantes a transportarse largas distancias en búsqueda de combustible o a usar leña como materia prima para la cocción de sus alimentos, ocasionando daños a su salud, al medio ambiente, e incluso inconformidad de la población con las operaciones realizadas por la empresa por la falta de búsqueda de relaciones de beneficio mutuo.

Con el fin de aprovechar las potencialidades energéticas del país y fomentar una conciencia social y ambiental, se realiza una recolección de datos y un análisis integral que permite la planificación y estructuración del proyecto para proveer gas natural domiciliario a las viviendas aledañas al campo Cerro Gordo, que mejore la calidad de vida de la población, contribuya al desarrollo social y económico y fortalezca la relación de la operadora con sus habitantes.

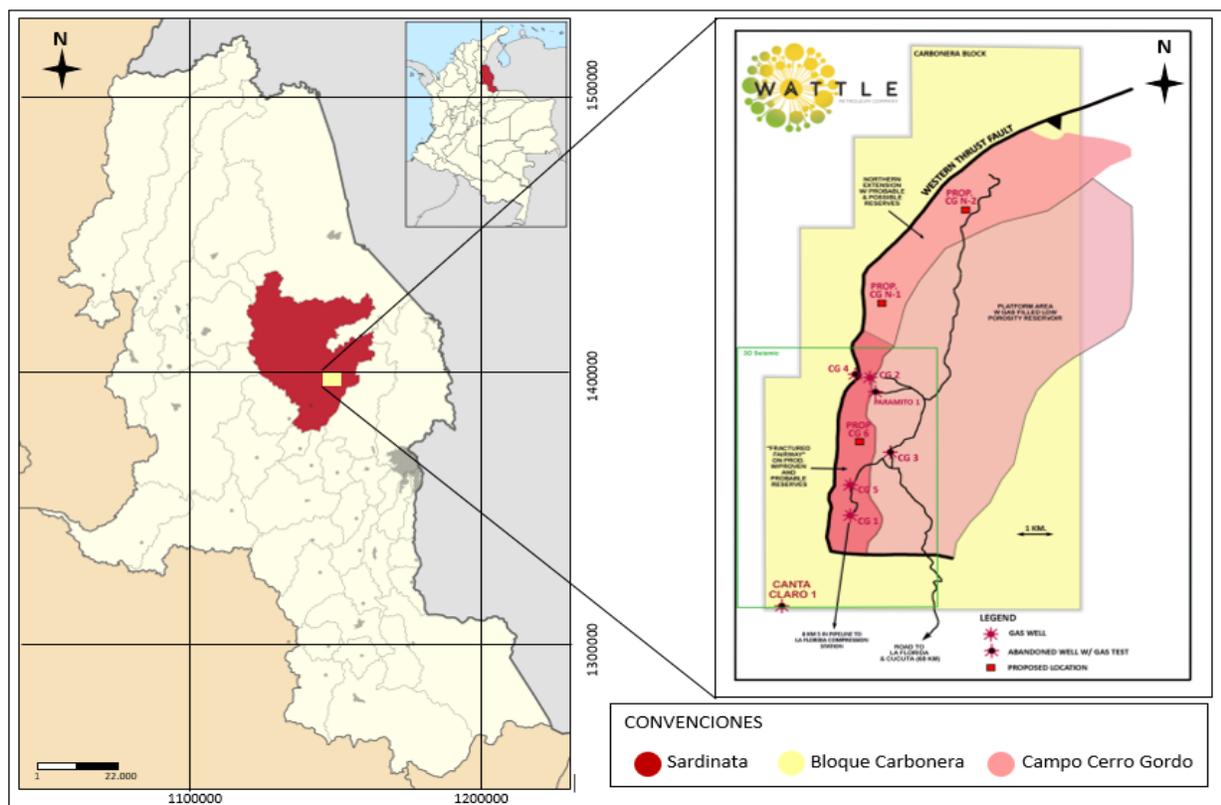
1. MARCO TEÓRICO

En esta sección se expone información relevante para iniciar con el desarrollo de la propuesta que se ostenta en el presente proyecto, como son: la localización geográfica del campo de interés, su historial de producción, pozos activos, producción a la fecha, y facilidades de producción con las que se cuenta actualmente en la locación. Adicionalmente en esta sección, se estudian las características del gas extraído y las etapas de proceso por las cuales se da manejo a la producción del campo Cerro Gordo, el cual, será el recurso que se transportaría a través de la línea de distribución que se propondrá en el proyecto para abastecer a las familias de la vereda San Roque.

1.1 Generalidades del campo cerro gordo

Figura 1.

Localización geográfica del Campo Cerro Gordo



Nota. La figura muestra la localización geográfica del campo cerro gordo. Tomado de D. S. Albarracín B., M. C. Arango T. *Diseño del sistema virtual y la red de distribución de gas natural*

en el municipio de Bucarasica desde el campo Cerro Gordo, tesis pregrado. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2019.

El campo Cerro Gordo, operado desde el año 2006 por la empresa Wattle Petroleum Company, se encuentra ubicado en las cercanías de la vereda San Roque, en el Municipio de Sardinata, Norte de Santander. Este campo está ubicado en la cuenca sedimentaria del Catatumbo y pertenece al Bloque Carbonera, el cual tiene una extensión de aproximadamente 14.639,8351 hectáreas, limitando 40 kilómetros al Noreste con la cabecera municipal de Cúcuta, al Norte y Noreste con el campo Tibú, al Este con el Bloque González y al Oeste y Noreste con el Bloque Catguas [2]. En la figura 1 se presenta el mapa de localización geográfica del campo Cerro Gordo.

Para llegar al campo Cerro Gordo desde Bogotá, es necesario transportarse a la ciudad de Cúcuta, bien sea por vía aérea con una duración de 1h aproximadamente o por vía terrestre recorriendo 556 kilómetros tomando la Carretera 55, de allí por la vía Ocaña-Cúcuta se recorren aproximadamente 55 kilómetros al campo Cerro Gordo con una duración de 1:20 horas.

1.1.1 Sistema Petrolífero

La cuenca Catatumbo consta de amplios bloques estructurales correspondientes a sistemas de fallas transpresionales que se caracterizan por estructuras en flor y con profundo enraizamiento en el basamento [3], que a su vez, dieron lugar al desarrollo y entrapamiento de grandes cantidades de hidrocarburos en varios campos de la cuenca, como Tibú, Petroléa, Río Zulia y nuestro campo de interés Cerro Gordo.

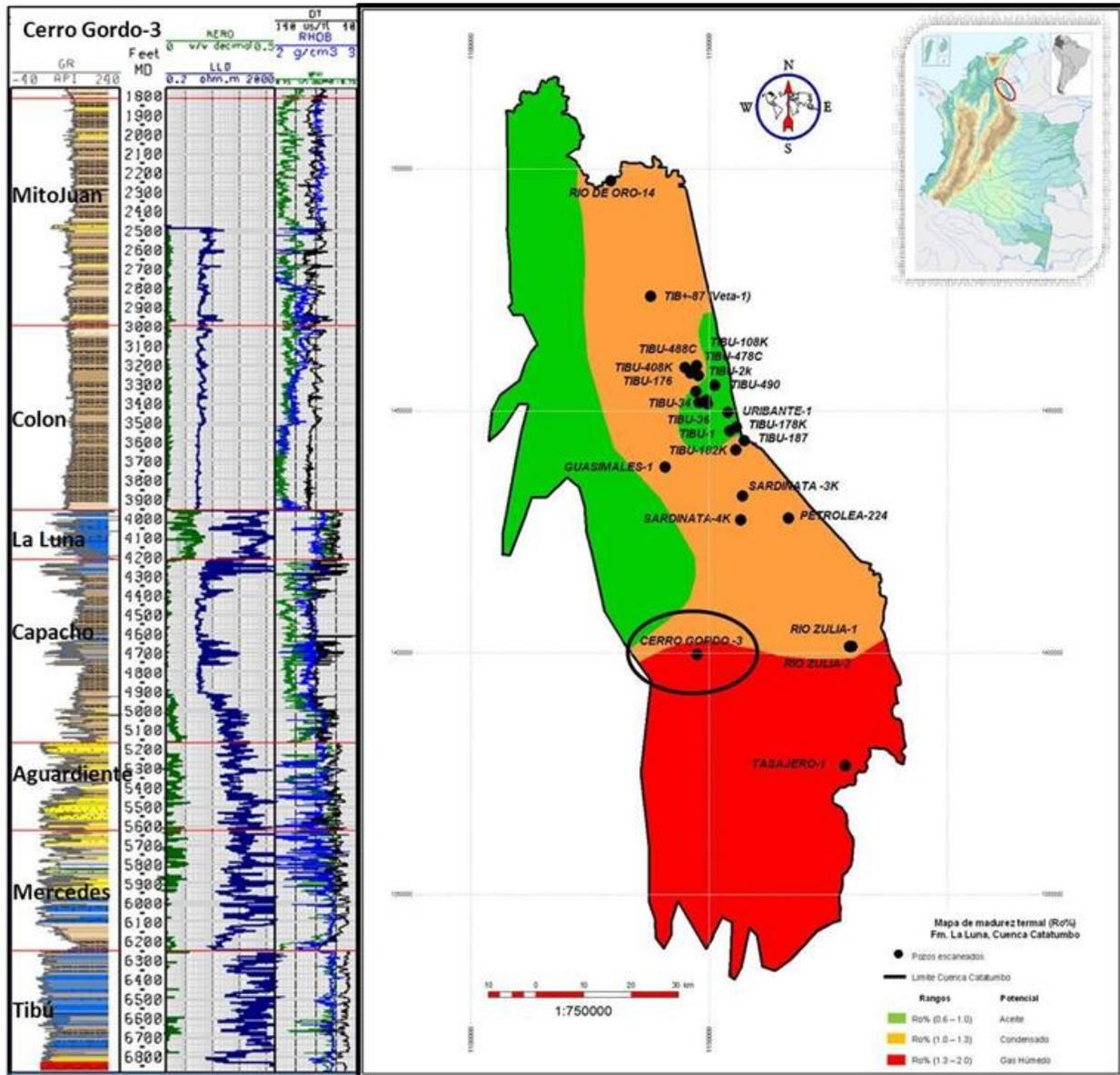
Las unidades que pertenecen a la columna estratigráfica del Catatumbo, en su mayoría desde la formación Tibú, siendo la más profunda, hasta la formación Carbonera, la cual es la más somera, albergan yacimientos de hidrocarburos.

La roca generadora por excelencia en esta cuenca, es la formación La Luna, compuesta principalmente por calizas con intercalaciones de lutitas ligeramente calcáreas y con alto contenido de sílice, este último, está ligado a que el porcentaje de sílice incrementa hacia la dirección sur de la cuenca, que mediante estudios de geología y geofísica expuestos por la ANH se ha verificado

que existe una profundización en esta dirección, y cabe resaltar que el campo Cerro Gordo está localizado en esta dirección.

Figura 2.

Registro eléctrico del pozo Cerro Gordo-3



Nota. La figura muestra el registro de pozo obtenido para cerro gordo-3 con mapa de madurez termal de formación la Luna. Tomado de Agencia Nacional de Hidrocarburos, *Integración Geológica de la digitalización y análisis de núcleos, cuenca Catatumbo*, Bogotá, Diciembre 2012.

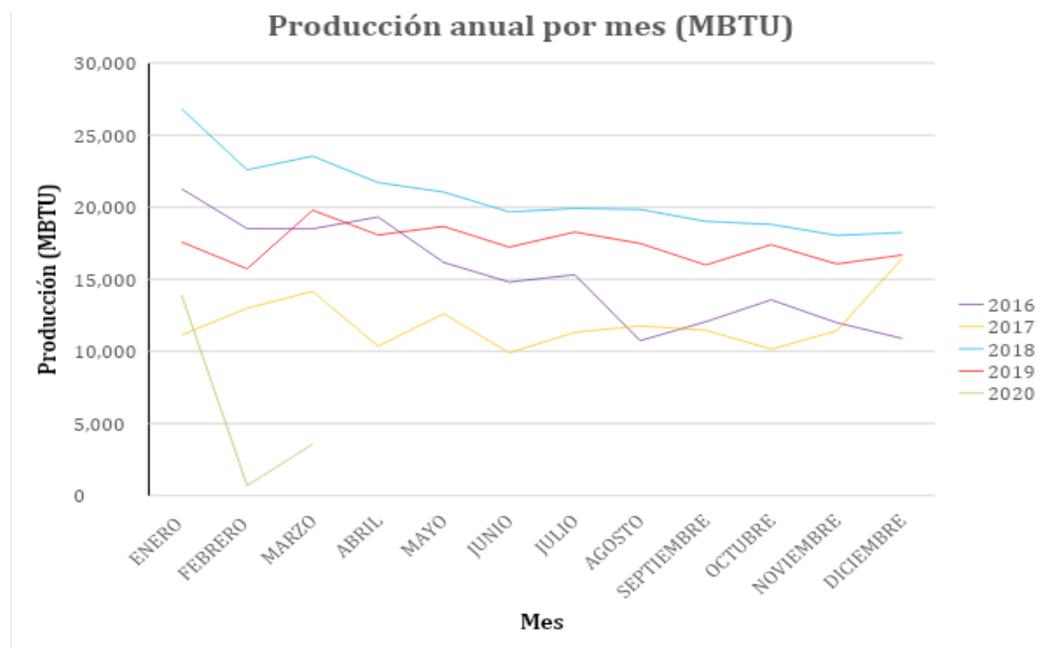
En la formación la Luna, la dispersión de porosidad vs. Porosidad asociada a la materia orgánica, se encuentra entre el 80 y 100%, por consiguiente, es considerada un yacimiento lutítico, en donde la roca generadora es la misma roca almacén [3]. Estas características, sumado al alto contenido orgánico y la madurez termal, la convierten en una roca con buena fragilidad ligada a yacimientos fracturados, de manera que, la producción del hidrocarburo en el campo Cerro Gordo se da de las calizas fracturadas de esta formación.

La formación que actúa como roca sello en el sistema petrolífero del campo Cerro Gordo, es la Formación Colón, que está caracterizada por tener grandes espesores con composición de shale y areniscas, que impiden la migración de hidrocarburos provenientes del Cretácico, es decir, es la formación La Luna. Es importante resaltar que para toda la cuenca, la Formación La Luna, alcanzó ventana de generación de aceite, y en la parte sur de la cuenca llegó a la Ventana de generación de gas seco [3], como se puede observar en el mapa de madurez termal en la figura 2.

1.1.2 Historial de producción

Figura 3.

Perfil de producción mensual del campo cerro gordo



Nota. Se representa el perfil de producción total del campo hasta el año 2020, que incluye la producción de gas proveniente de los dos pozos activos a la fecha, CG-1 y

CG-5. Elaborada con base en información proporcionada por WATTLE PETROLEUM COMPANY S.A.S

El campo Cerro Gordo fue descubierto en el año 1987 con la perforación del pozo Cerro Gordo-1, y pese a las problemáticas de orden social que aquejan a la región, el campo Cerro Gordo ha venido desarrollándose desde su descubrimiento, con un total de 8 pozos perforados, alcanzando actualmente una producción diaria de un millón cien mil pies cúbicos de gas, provenientes de dos pozos [4], CG-1 y CG-5, mediante método de producción de flujo natural.

En la figura 3 se puede observar el histórico de producción total de gas de todo el campo, es decir, la producción del pozo descubridor CG-1 y el pozo CG-5 que fue completado el 30 de enero de 2013. La información de producción mensual que se reporta a continuación es desde el año 2016 hasta el año 2020, teniendo en cuenta que por motivos de pandemia el año 2020 presenta una producción hasta el mes de marzo.

1.1.3 Facilidades de superficie

Para el manejo, transporte y tratamiento del gas extraído en el campo Cerro Gordo, se cuenta con unas facilidades de superficie sencillas y una planta ubicada a ocho kilómetros del campo, llamada La Florida.

Las facilidades que se encuentran en la locación, constan de dos separadores horizontales trifásicos que cumplen la función de separar el gas de los arrastres de otros fluidos del pozo como son los condensados y agua, individualmente para cada pozo productor, CG-1 y CG-5.

Para conducir el fluido hacia los separadores se cuenta con una línea principal que va desde el árbol de producción de cada pozo hasta el separador, las cuales cuentan con válvulas como accesorios en toda su extensión, esto con el objetivo de regular el flujo y controlar la presión en las tuberías. Se observa en la figura 4 que existe una línea secundaria antes de los separadores, la cual, está conectada a las dos líneas principales de cada pozo y es utilizada para casos de emergencia según se requiera.

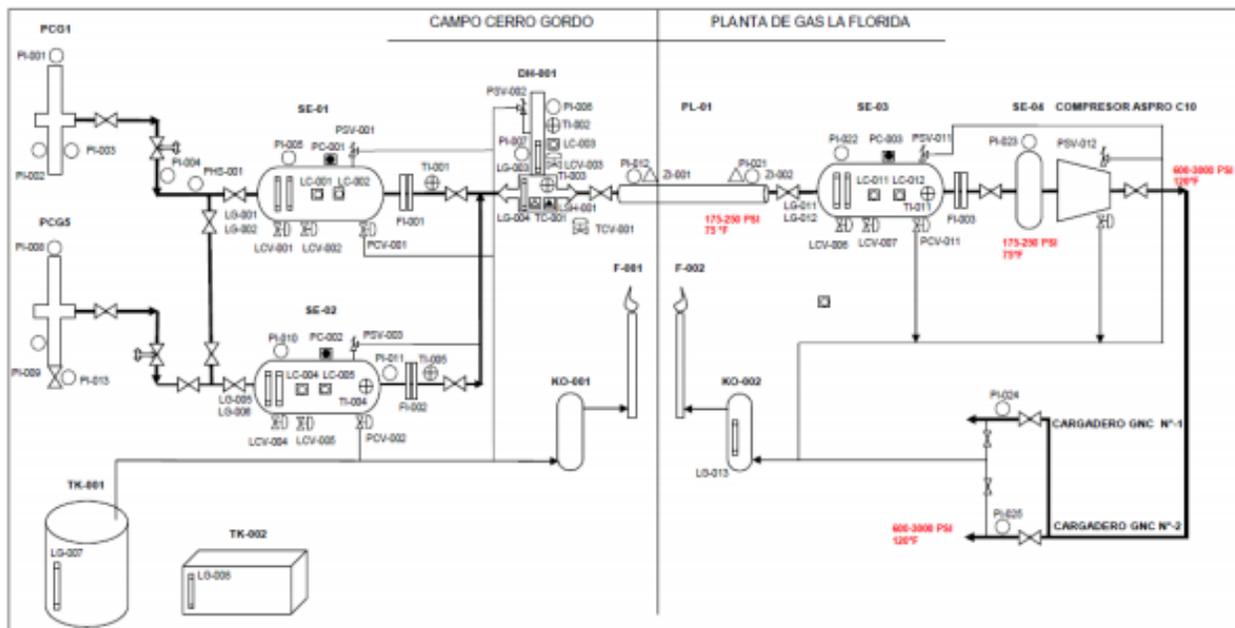
A la salida de cada separador se encuentran instalados unos sistemas de medición que sirven como base para establecer la producción de cada pozo para posteriormente fluir por una única línea

principal. Por otro lado, los condensados que se depositan en los separadores son enviados al tanque atmosférico vertical y el agua se deposita en un FracTank. El gas de ambos pozos es enviado a un deshidratador con Trietilenglicol (TEG) para remover la humedad del gas de 100 lbH₂O/MSCFD a 6 lbH₂O/MSCFD para garantizar la integridad del gasoducto que transporta el gas desde esta unidad a la Planta La Florida, a través de esa línea se cuenta con indicadores de posición, con el objetivo de indicar dónde se encuentra el flujo de gas.

Los fluidos transportados a través del gasoducto, es recibido en la planta por un separador horizontal trifásico, para posteriormente ser enviado a un sistema de compresión, que consiste en un separador inter-etapas para mejorar calidad del gas y por un compresor, donde se comprime el gas a 3000 psi, para ser enviado a la sección de llenado de GNC y entregar a la compañía comercializadora y consumidor final.

Figura 4.

Diagrama P&ID de la facilidad de superficie del Campo Cerro Gordo y planta La Florida.



Nota. Diagrama de tuberías e instrumentación -P&ID- de la facilidad de superficie del campo Cerro Gordo y Planta de gas la Florida. Tomado de Procedimiento operación campo Cerro Gordo, Wattle Petroleum Company S.A.S, Rep. PR-PH-01, Agosto 2016, p. 4-5.

1.2 Generalidades del gas natural

El gas natural es un energético que se extrae del subsuelo (yacimientos) al igual que el petróleo y puede encontrarse asociado cuando el gas está disuelto con este, también se puede encontrar gas libre cuando se tiene yacimientos característicos de gas natural, comúnmente al gas natural se le agrega un odorizante llamado mercaptano, lo cual permite la detección de este combustible fósil en cualquier momento, además, se considera como el tipo de energía más amigable con el medio ambiente ya que no contamina y no es tóxico; su distribución se da por medio de gasoductos (usualmente compuestos de acero y polietileno), y debe cumplir con ciertas especificaciones de calidad con el fin de evitar la presencia de formación de hidratos, ya que, se presentaría una pérdida de eficiencia en el sistema de transporte. En la tabla 1 se muestra la composición típica del gas natural.

Tabla 1.

Composición típica del gas natural

Constituyente	Formula química	Composición por volumen (%)
Metano	CH ₄	81.86
Etano	C ₂ H ₆	11.61
Propano	C ₃ H ₈	1.92
I-Butano	C ₄ H ₁₀	0.23
N-Butano	C ₄ H ₁₀	0.22
Nitrógeno	N ₂	0.90
Dióxido de carbono	CO ₂	3.19

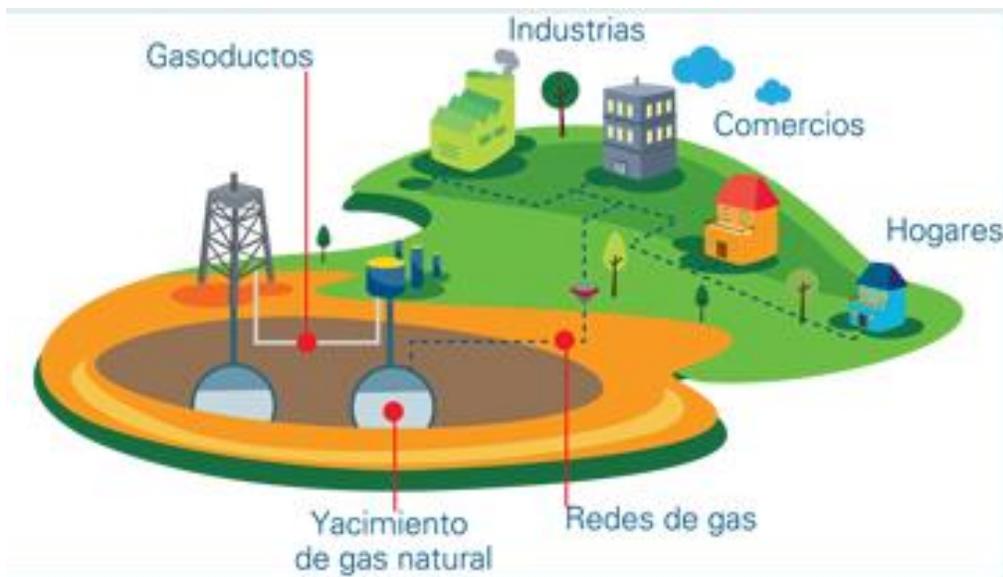
Nota. Esta tabla muestra la composición típica por volumen en % de cada elemento que constituye el gas natural en Colombia. 2019. Tomado de Vanti Gas Natural, “¿Qué es el gas natural?”, [En línea], <https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/que-es/>. [Acceso: febrero 2021]

El servicio público domiciliario de gas natural por redes, de acuerdo con la Ley 142 de 1994, es el conjunto de actividades económicas que se requieren para que los usuarios puedan recibir el servicio de gas en sus predios [5]. Estas actividades son: producción, transporte, distribución y comercialización.

La producción es la actividad en la que se extrae el gas almacenado en el yacimiento hasta la superficie, para posteriormente ser tratado y transportado hasta las estaciones ubicadas en los alrededores de las ciudades, este transporte se realiza a través de gasoductos, o bien sea por tanques transportados por vehículos cuando se trata de GNC o GLP, para finalizar con la distribución que consiste en llevar el gas a por redes de tubería desde estas estaciones hasta las conexiones de los usuarios. Según la metodología general adoptada mediante la Resolución CREG- 011 de 2003, se han encontrado varias iniciativas tendientes a utilizar la tecnología de transporte de gas natural como GNC para la prestación del servicio público domiciliario de gas natural en poblaciones aisladas de los sistemas de transporte [6].

Figura 5.

Diagrama de distribución de gas natural



Nota. La figura representa el diagrama de distribución de gas natural desde el yacimiento hasta su destino final (hogares, industrias, comercios). Tomado de Vanti Gas Natural, “¿Qué es el gas natural?”, [En línea], <https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/que-es/>. [Acceso: febrero 2021]

1.2.1 Técnica del gas natural comprimido (Gasoducto virtual)

Bajo condiciones normales de presión y temperatura, el gas natural se encuentra en estado gaseoso, por lo cual, a diferencia de otros combustibles, su transporte y almacenamiento es más costoso. Cuando la demanda a atender es pequeña, la construcción de un gasoducto puede no ser la mejor opción de transporte desde el punto de vista económico y por tal razón, se hace uso de la técnica de GNC para transportar el gas desde el centro de producción hasta la estación de consumo en vehículos apropiados para tales fines, para luego distribuirlo por la red a los usuarios finales, esta técnica se conoce como gasoducto virtual.

El GNC requiere de tres etapas: **La compresión**, que mediante un compresor se aumenta la presión del gas que se deposita en cilindros o tanques. La presión máxima utilizada para el gas comprimido es de 3600 psig. **El transporte y almacenamiento**, en donde los cilindros o tanques se transportan en vehículos por carretera o vía fluvial, lo que se conoce como gasoducto virtual. **La descompresión**, que reduce la presión mediante válvulas para expandir el gas y poder inyectar el gas a las redes de distribución para que llegue a los usuarios finales.

Mediante esta técnica se aumenta la presión del gas en módulos transportados por vehículos, ateniéndolos en su estado gaseoso, de tal forma, que se incrementa la energía por unidad de volumen reduciendo los costos unitarios de transporte [6] Estos módulos son muy resistentes a alta presión e imposibilitan la entrada de aire, y con ello la reducción de mezclas explosivas, a diferencia de GLP, los cuales son almacenados en tanques a presión atmosférica y pueden permitir el ingreso de aire que al mezclarse con vapores de combustible pueden ocasionar una reacción peligrosa.

Es importante tener en cuenta el Decreto No. 1609 de 31 de julio de 2002, mediante el cual Ministerio de Transporte reglamentó el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera, como lo es el GNC y GLP. Sumado a la NTC 5897, la cual establece los requisitos mínimos para el diseño, construcción y puesta en servicio de las instalaciones pertenecientes a las estaciones de carga y descarga de GNC que se abastece por vía terrestre [7] y la NTC 5773, que habla sobre los sistemas para transporte terrestre de GNC.

1.2.2 Especificaciones de calidad para transporte por tuberías en Colombia

En 1999 se adopta el “Reglamento único de Transporte de Gas Natural –RUT “, por medio de la Resolución CREG 071. Allí se presentan las especificaciones en cuanto a calidad del gas natural entregado en el punto de entrada del sistema de transporte al transportador, la tabla 2 presenta las especificaciones de calidad para el transporte de gas natural por tuberías en Colombia.

Tabla 2.

Especificaciones para transporte de gas natural por tuberías

Especificaciones	Sistema Internacional	Sistema Inglés
Máximo poder calorífico bruto (GHV)	42.8 MJ/m ³	1,150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico (GHV)	35.4 MJ/m ³	950 BTU/ft ³
Contenido líquido	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H ₂ S máximo	6 mg/m ³	0.25 grano/100 PCS
Contenido total de Azufre máximo	23 mg/m ³	1.0 grano/100 PCS
Contenido CO ₂ , máximo en % volumen	2%	2%
Contenido de N ₂ , máximo en % volumen	3%	3%
Contenido de inertes máximo en % volumen	5%	5%
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0.1%	0.1%
Contenido de agua máximo	97 mg/m ³	6.0 Lb/MPCS
Temperatura de entrega máxima	49 °C	120 °F
Temperatura de entrega mínima	4.5 °C	40 °F
Contenido máximo de polvos y materiales en suspensión	1.6 mg/m ³	0.7 grano/1000 pc

Nota. Esta tabla muestra las especificaciones en sistema internacional y en sistema inglés para el transporte de gas natural en Colombia mediante tubería. Tomado de Comisión de Regulación de Energía y gas. (febrero 13, 2017) Resolución CREG-017.

Los objetivos de presentar estas especificaciones en cuanto a la calidad del gas transportado mediante tuberías son:

- Proteger la integridad del Sistema de Transporte y de las instalaciones de los Agentes.
- Permitir el intercambio de gases de tal forma que no se afecte la combustión en quemadores diseñados para la segunda familia de combustibles gaseosos [8].

1.2.3 Normativas y Criterios para el diseño eficiente de redes

Para el diseño eficiente de la red de distribución de gas natural propuesta en este proyecto se utilizará la norma técnica colombiana NTC2505 “Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales y comerciales”, en donde se establecen los requisitos que se deben cumplir en el diseño y construcción de instalaciones para el suministro de gas combustible destinado a uso residencial y comercial, así como las pruebas a que se deben someter dichas instalaciones para verificar su operación confiable y segura [9].

Las instalaciones para suministro de gas combustible cubiertas por esta norma comprenden los sistemas de tubería, accesorios, elementos y otros componentes que van desde la salida de la válvula de corte (registro) en la acometida hasta los puntos de conexión de los artefactos de uso doméstico que funcionan con gas [10].

En la norma general NTC2505, de la cual se apoyará el presente proyecto, se establece que para la determinación de los parámetros de diseño se tendrán en cuenta otras tres (3) normas técnicas colombianas (NTC), las cuales son relacionadas a continuación:

- NTC 4282: “Instalaciones para suministro de gas destinadas a usos industriales”, las instalaciones cubiertas por esta norma comprenden los sistemas de tuberías, accesorios, elementos y otros componentes que van desde la salida de la válvula de corte (registro) en la acometida, hasta los puntos de conexión para los artefactos a gas, cuando el combustible empleado es gas de la segunda o tercera familia [11].
- NTC 3728: “Gasoductos, líneas de transporte y redes de distribución de gas”, en donde se establecen los requisitos que deben cumplir las líneas de transporte y las redes de distribución de gases combustibles, en cuanto al diseño, materiales, construcción, verificación y pruebas, condiciones de operación y exigencias relativas al mantenimiento y control de la corrosión [12].
- NTC 3838: “Gasoductos, presiones de operación permisibles para el transporte, distribución y suministro de gases combustibles”, en donde se establecen las presiones de operación permisibles en los sistemas que se utilicen para el transporte, distribución y suministro de gases combustibles, en aplicaciones de uso residencial, comercial, e industrial, bajo condiciones normales de servicio, de acuerdo con las características particulares de construcción y

funcionamiento de tales sistemas, para salvaguardarla de la seguridad en el uso y manejo de estos combustibles [13]

- NTC 1746: “Plásticos, tubos y accesorios termoplásticos para conducción de gases a presión”, en donde se cubre los requisitos y métodos de ensayo para el material, dimensiones y tolerancias, resistencia a la rotura por presión hidrostática, resistencia química, y resistencia al impacto de tubos y accesorios plásticos destinados a la aplicación en redes de transporte y distribución de gas para uso bajo tierra o en revestimiento de redes ya existentes.

1.2.4 Análisis composicional del gas extraído en el campo Cerro Gordo

Tabla 3.

Análisis composicional del gas extraído

Componente	Símbolo	Porcentaje molar	Porcentaje en peso
Metano	C ₁	72.69	50.21
Etano	C ₂	9.68	12.54
Propano	C ₃	3.53	6.71
I-Butano	iC ₄	0.57	1.44
N-Butano	nC ₄	0.96	2.41
I-Pentano	iC ₅	0.35	1.09
N-Pentano	nC ₅	0.34	1.05
Hexano	C ₆	0.39	1.42
Heptano	C ₇	0.30	1.15
Octano	C ₈	0.22	1.05
Nonano	C ₉	0.08	0.46
Decano	C ₁₀	0.03	0.15
Undecano	C ₁₁	0.01	0.09
Dióxido de carbono	CO ₂	10.37	19.65
Nitrógeno	N ₂	0.48	0.58

Nota. Esta tabla muestra el análisis composicional del gas extraído en el campo cerro gordo, mediante cromatografía, presentando valores de porcentaje molar y porcentaje en peso. Tomado de Core Lab Reservoir Optimization, “Análisis Composicional del gas Cerro Gordo”, Wattle Petroleum Company, 2017.

El análisis composicional del gas extraído del Campo Cerro Gordo se llevó a cabo haciendo uso de un cromatógrafo Varian 3800 mediante el método GPA 2286, el cromatógrafo utiliza tres columnas con el fin de lograr una identificación clara de todos los componentes eluidos (C₁ hasta C₁₂₊, N₂ y CO₂). Además, se realizó la medición de sulfuro de hidrógeno en el flujo de gas mediante

tubos colorimétricos (Tubos Dräger) los cuales contienen una serie de compuestos que reaccionan con las moléculas de sulfuro de hidrogeno presentes en el gas, el tubo tiene una serie de escalas las cuales permiten medir la cantidad de sulfuro de hidrógeno dependiendo de la cantidad de gas succionado y el cambio de coloración de los compuestos dentro del tubo. La muestra fue tomada en el Pozo Cerro Gordo-1 en la cabeza del pozo, a una presión de 260 psig y una temperatura de 89 °F. La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos de los análisis realizados al gas producido.

Se puede observar a partir del análisis cromatográfico que el gas producido del campo está compuesto principal por el hidrocarburo metano, siendo 72.69% su composición total en el gas, obteniendo menores proporciones de otros hidrocarburos como el etano y propano u otros componentes más pesados al C₇₊ que se encuentra en proporciones muy pequeñas, por lo cual, se considera como un gas pobre, en vista que contiene una cantidad insignificante de hidrocarburos líquidos, que nos proporciona para este análisis un factor de conformidad respecto a las especificaciones de calidad de gas natural en el país.

Resultado de este análisis cromatógrafo se puede verificar que el gas producido en el campo Cerro Gordo, es un gas medianamente seco, por tal razón es de entenderse que las facilidades de producción actualmente ubicadas en la locación son sencillas y que la producción de condensados y agua sea casi nula, sin embargo, si se llegase a presentar producciones de líquidos, se puede dar manejo de estos fluidos por los equipos ubicados en superficie.

A partir de la cromatografía también se observa que el gas contiene un alto contenido de CO₂, que puede producir corrosión por la interacción de agua en las tuberías de transporte. Se conoce igualmente que este componente es potencial del fenómeno del calentamiento global, sin embargo, la cantidad presente en su estado natural resulta despreciable para afectar el ambiente. La presencia de este componente en el gas producido sobrepasa el valor permisible para el transporte de gas natural en Colombia mediante tubería y resulta en un incremento también en el contenido evaluado en la norma respecto al máximo de inertes permitido, por lo cual, se tendrá que prestar atención a este componente del gas producido del campo, para la construcción del diseño de las redes de distribución, ya que estas altas concentraciones pueden afectar la seguridad y costos de transporte.

Tabla 4.*Propiedades del Gas del campo Cerro Gordo*

Propiedad	Unidad
Gravedad Especifica	0.8032
Peso Molecular	23.220 g/mol
Densidad Ideal	0.9788 kg/m ³
Presión Pseudocrítica	704.10 psia
Temperatura Pseudocrítica	411.20 R
Factor de Compresibilidad	0.996420
Poder Calorífico bruto real	1129.8 BTU/SCF
Poder Calorífico neto real	1024.5 BTU/SCF
Contenido de vapor de agua	6 lbH ₂ O/MSCF

Nota. Esta tabla muestra las propiedades del gas extraído en el campo cerro gordo. Tomado de Core Lab Reservoir Optimization, “Análisis Composicional del gas Cerro Gordo”, Wattle Petroleum Company, 2017.

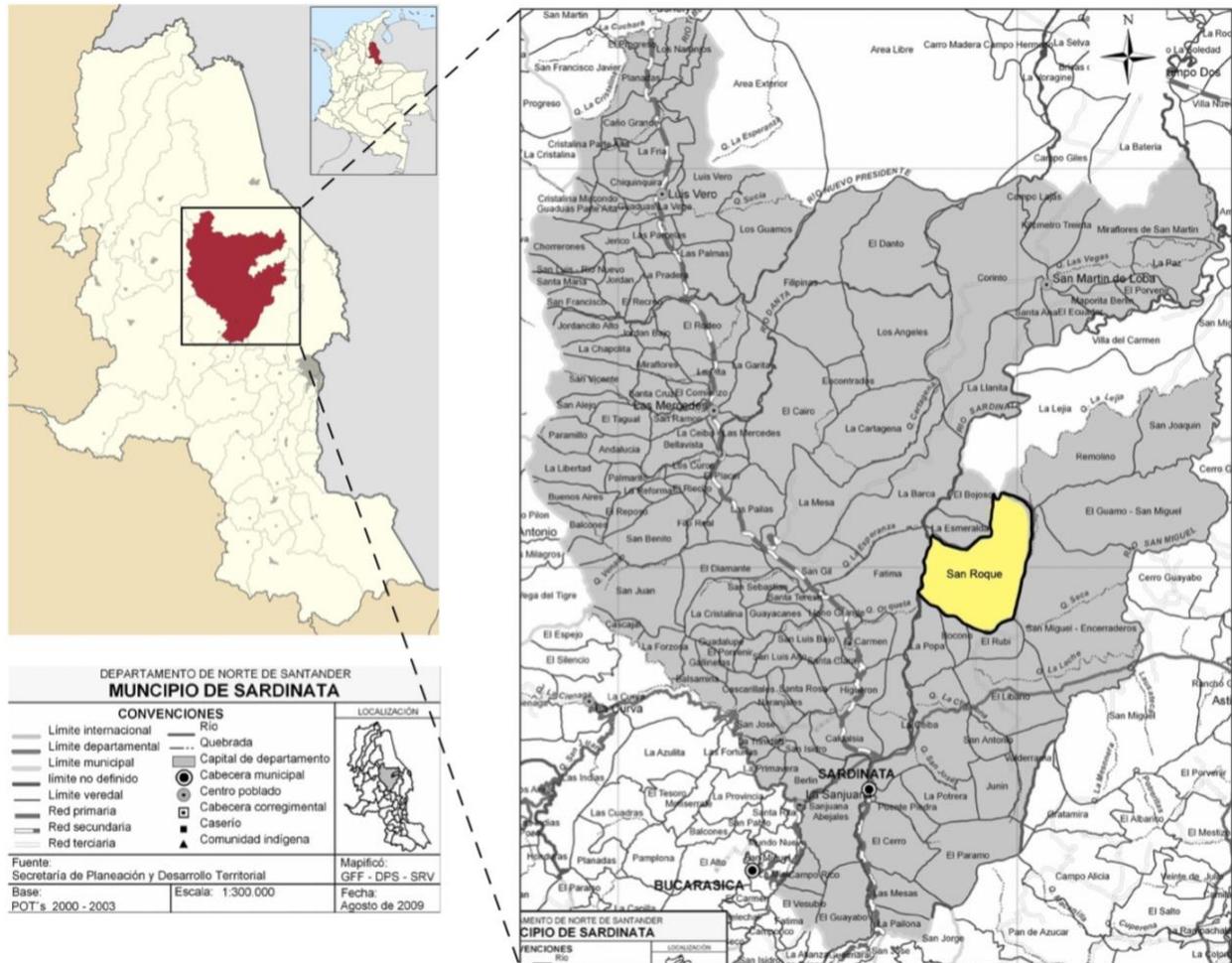
Se puede observar que el poder calorífico del gas extraído está dentro del rango permitido por la norma establecida en la Resolución CREG 071, el cual, es un factor muy importante para evitar condiciones inseguras relacionadas con la combustión incompleta en aplicaciones domésticas para los casos en que las concentraciones de CO₂ o N₂ están altas, como es el caso del gas producido en el campo. Así mismo se observa que el contenido de vapor de agua presente en el GN no sobrepasa los límites establecidos por la norma para ser utilizado y transportados por los sistemas de redes de GN en el país.

1.3 Generalidades de la Vereda San Roque

San Roque es una Vereda que se encuentra ubicada a 18 km del noroccidente del Municipio de Sardinata, Norte de Santander, que se encuentra situado sobre la cordillera Oriental, a una distancia aproximada de 70 km de la capital del departamento, Cúcuta, esta pequeña Vereda cuenta con una población cercana a los 150 habitantes y con temperatura promedio es de 24°C.

Figura 6.

Ubicación geográfica de la Vereda San Roque



Nota. La figura muestra la localización geográfica de la Vereda San Roque en el Municipio de Sardinata. Tomado de Gobernación Norte de Santander, “Mapa político administrativo mapa veredal”. [En línea]. <https://www.corponor.gov.co/pot/Sardinata/rural/veredal.pdf>. [Acceso: febrero, 2021]. Modificado por autores.

En la Vereda se tiene una baja producción agrícola de cultivos como son: cacao, maíz, plátano y yuca; producción pecuaria ovina, avícola y porcina pero que en su mayoría es dedicado para autoconsumo de sus pobladores; sumado a la explotación del sector minero, la cual es la mayor fuente de riqueza de San Roque, y de la cual se ocupan en esta actividad la mayoría de personal de la vereda obteniendo sus ingresos económicos, sin embargo, se presentan altos índices de

pobreza. La mayoría de las viviendas se encuentran en estrato 1 y como ha venido hablando, los habitantes no cuentan con una red de distribución de gas natural domiciliario, por lo cual, para cubrir sus necesidades alimentarias, los habitantes compran cilindros de gas propano en el Municipio de Sardinata o hacen uso de la leña como fuente combustible, siendo entonces un territorio de limitados recursos económicos.

Figura 7.

Vista satelital Vereda San Roque, Campo Cerro Gordo y Planta La Florida

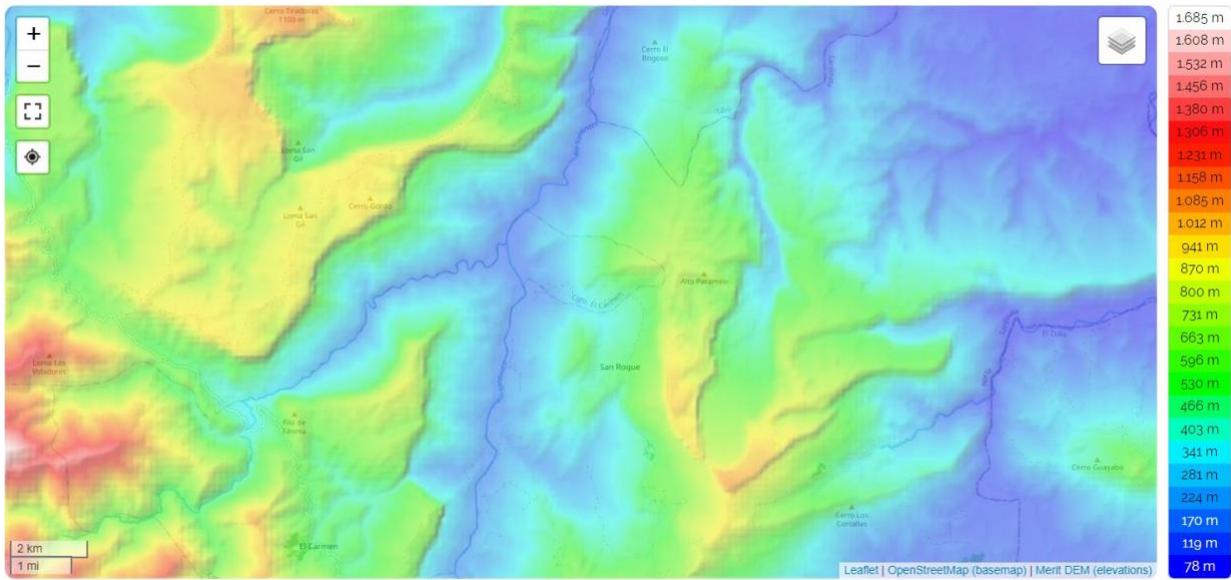


Nota. La figura muestra la localización geográfica de la Vereda San Roque, Campo Cerro Gordo y Planta La Florida. Tomado de Google Earth Pro, 7.3.4, [En línea], google LLCC, 2021.

San Roque está ubicado en un sistema montañoso con una extensión de aproximadamente 48 km, latitud de 8.21639 y Longitud de -72.7436, con una altitud aproximadamente de 500m, en las cercanías a la vereda se tiene el río Sardinata, algunos acuíferos, el campo Cerro Gordo ubicado a aproximadamente 3.3 km de distancia y la Planta de Gas La Florida a aproximadamente 16 km del centro poblado de San Roque, como se puede observar en la anterior figura.

Figura 8.

Mapa topográfico Vereda San Roque



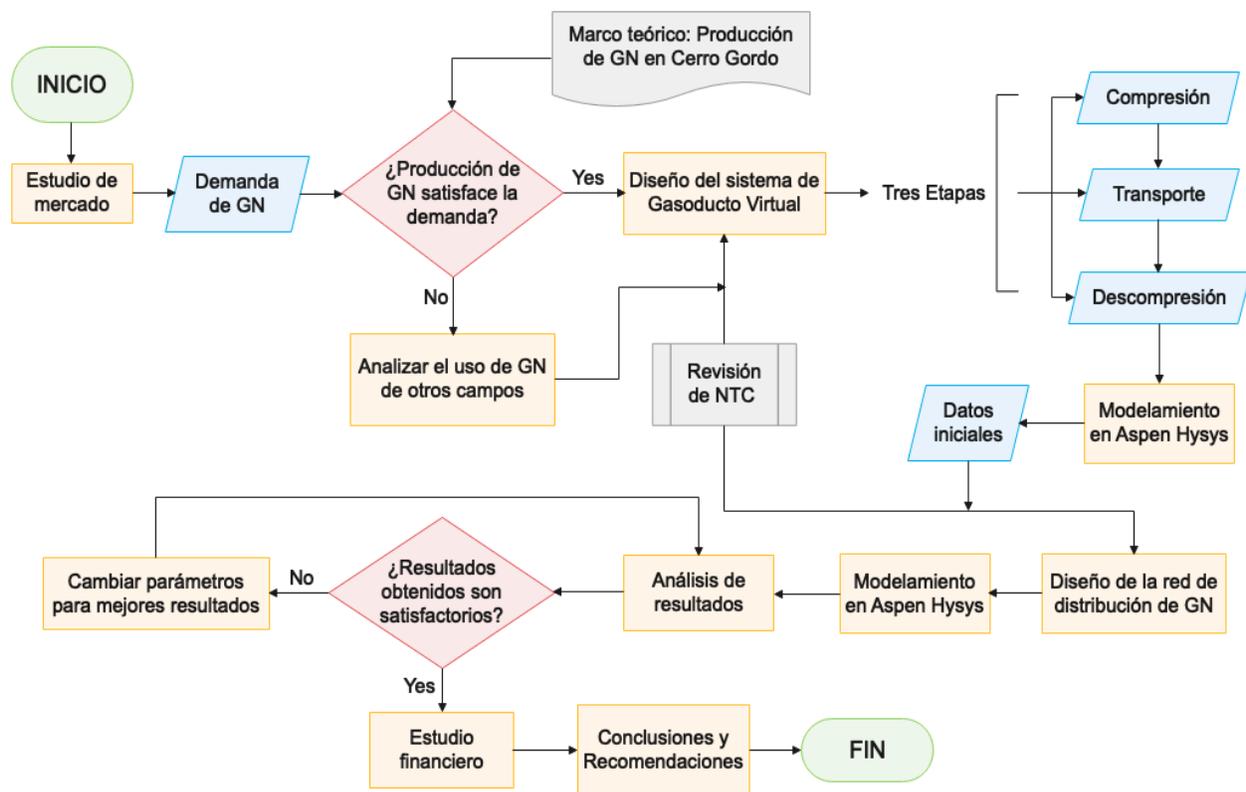
Nota. La figura muestra mapa topográfico de la Vereda San Roque. Tomado de Topo-Graphic. 7.4, [En línea], google LLCC, 2021.

2 METODOLOGÍA Y DATOS

En este capítulo se presenta el procedimiento que se utilizará para cumplir con los objetivos planteados del proyecto y se discuten las fórmulas o modelos matemáticos que servirán para la obtención de los datos que son aplicables para iniciar con el desarrollo del diseño de la red de distribución de gas proveniente del campo cerro gordo en la Vereda San Roque y las zonas aledañas, información en la que nos apoyaremos para la construcción del modelo en el software HYSYS para la predicción del comportamiento del tendido de la tubería a proponer y orientar las decisiones. A continuación, se presenta un diagrama de flujo en donde se detalla resumidamente la metodología que se llevara a cabo:

Figura 9.

Diagrama de flujo de la metodología



Nota. La figura muestra el diagrama de flujo que explica resumidamente el procedimiento que se llevara a cabo para el desarrollo del proyecto. Realizado mediante la herramienta EdrawMax, 7.4, [En línea], google LLC, 2021.

2.1 Estudio de mercado

Para la estimación de la demanda de gas natural de la vereda San Roque y fincas aledañas se realizará un estudio de mercado, en donde se menciona la zona urbana que corresponde a las viviendas localizadas en la Vereda San Roque y la zona rural que corresponde a las fincas que están aledañas al campo Cerro Gordo y a la Vereda. Este estudio se realizará por medio de un conteo de las viviendas y los habitantes que hay por cada una de ellas, en la tabla 5 se presenta la ficha técnica del estudio de mercado.

Tabla 5.

Ficha técnica estudio de mercado

Nombre del proyecto	Propuesta de un diseño de sistema de redes de distribución de gas natural doméstico para la Vereda San Roque y zonas aledañas al campo Cerro Gordo, en el departamento del Norte de Santander
Técnica de recolección	Personal tipo domiciliaria
Metodología de investigación	Cuantitativo
Ámbito geográfico	Municipio de Sardinata, Norte de Santander
Universo	Vereda San Roque y fincas aledañas
Muestra	80 casas
Grupo objetivo	Propietarios o arrendatarios
Fecha de campo	4 de noviembre de 2020

Nota. La tabla muestra la ficha técnica del estudio de mercado, en donde se incluyen aspectos como técnica de recolección, ámbito geográfico, entre otros.

Adicionalmente, para la zona rural de San Roque se contará con información de la distancia que existen entre las fincas y la vereda, para poder desarrollar el tendido de tubería completo y obtener datos generales de la población.

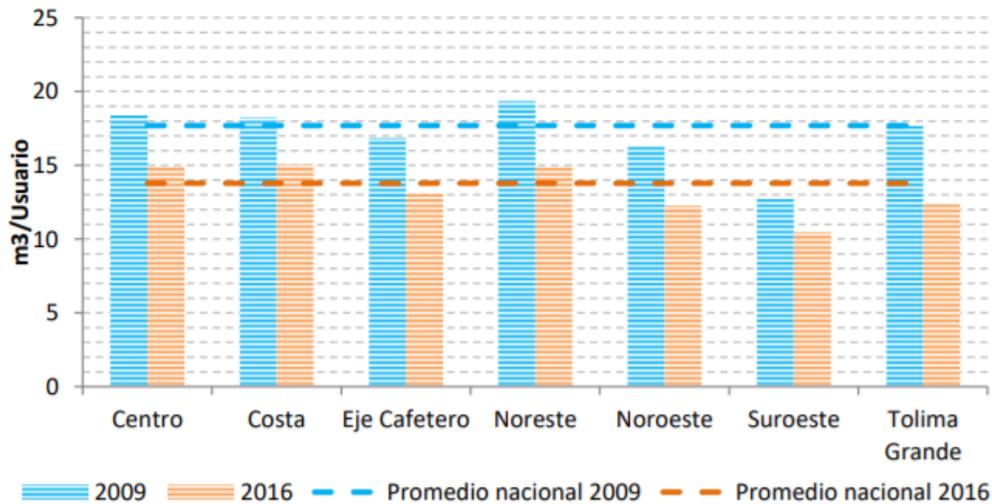
Es importante mencionar que por la situación actual de la pandemia del COVID, sumado a que actualmente la zona de influencia se encuentra con altos índices de riesgo, y con el fin de evitar la divulgación y la generación de expectativas con el proyecto que puedan involucrar futuros disconformidades con la comunidad, la empresa WPC será la encargada de la recolección de estos datos y por recomendación de ellos, se establece, que no se va a tener contacto directo con la comunidad, lo que imposibilita el desarrollo de encuestas a los habitantes de este sector.

2.2 Demanda de gas natural en la zona

Para estimar la *demanda actual de gas natural* en la cabecera municipal de San Roque y la zona rural, se va a utilizar un rango de consumo de gas teórico por vivienda, esto en vista a que no se puede intervenir presencialmente con sus habitantes, debido a la situación actual de la pandemia del COVID y que la zona de influencia se encuentra con altos índices de riesgo y conflictos.

Figura 10.

Consumo medio por región



Nota. Gráfica de consumo medio de gas natural por regiones del país para el año 2009 y 2016. Sistema de Información CONCENTRA, Inteligencia en energía, [En línea], <https://concentra.co/#>, [Acceso, marzo 2021].

Según la información que reposa en el sistema administrado por CONCENTRA, el cual es uno de los sistemas de información más confiable en el Mercado de Gas Natural en el país, se presenta a partir de estudios realizados, que, en la región Noreste, de la cual hace parte el Municipio de Sardinata, el consumo por usuario/vivienda, es de aproximadamente 15m³ para el año 2016, como se evidencia en la anterior gráfica, dato que se tomará para el cálculo aproximado de la demanda en la Vereda San Roque y sus fincas aledañas.

Con base en la información suministrada por la anterior gráfica y con la siguiente ecuación se determina la demanda actual de gas natural para la cabecera municipal de la vereda y la zona rural de la propuesta del presente proyecto a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Estimación demanda de gas natural

$$\text{Demanda: Consumo por vivienda de } 15\text{m}^3 \times \# \text{ Viviendas}$$

La *proyección de consumo de gas natural* es indispensable para garantizar el adecuado abastecimiento de gas a las viviendas de la vereda San Roque y las fincas aledañas al campo, así mismo, para determinar volúmenes óptimos para no incurrir en posibles contingencias por insuficiencia de gas a futuro. Esta demanda se estimará únicamente utilizando la última tasa de crecimiento demográfico promedio anual de 1.9%, obtenida a partir del DANE y con una proyección a 5 años.

2.3 Caracterización del sistema para abastecer de gas combustible a San Roque

En vista a la complejidad topográfica, a que la demanda a atender es baja y a las recomendaciones evidenciadas en el marco teórico, la caracterización del sistema para que los habitantes puedan recibir el gas combustible en sus predios, se va a dividir en dos etapas u actividades separadas posteriores a la producción:

1. Transporte del gas desde el centro de producción hasta la Vereda San Roque por la técnica de gasoducto virtual.
2. Distribución del gas hasta el domicilio o usuario final por medio de un tendido de tubería.

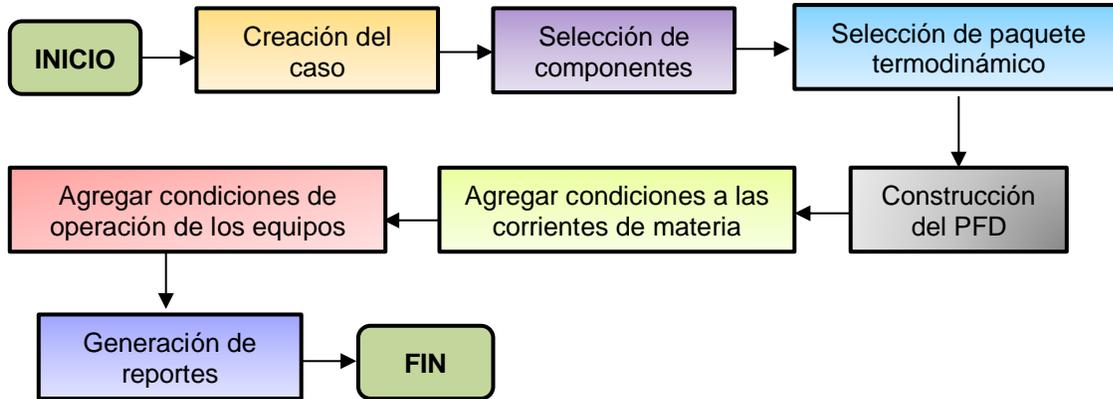
2.3.1 Transporte del gas mediante gasoducto virtual

En la primera actividad se va a especificar la ruta que recorrerá el vehículo que se utilizará para el transporte del GNC desde la estación de carga y compresión de gas (Planta la Florida) hasta la Vereda San Roque, mediante el programa ArcGIS Online. Adicional a esto se debe determinar el tipo de camión óptimo para abastecer la demanda establecida, así como la cantidad de módulos y la capacidad de cada uno de ellos, sumado a un cronograma con el número de trailers o viajes mensuales.

En esta actividad también se debe considerar las características y ubicación de la estación de descargue y descompresión del gas que garantice el cumplimiento de la normativa, seguridad y

operatividad, los componentes y las características de proceso de descompresión se modelaran en el software Aspen Hysys, en donde se seguirán los pasos del siguiente algoritmo para su construcción , con el fin de evaluar el proceso y obtener resultados de importancia para iniciar con **Figura 11.**

Algoritmo para diseño del sistema de descompresión



Nota. La figura muestra el algoritmo para el diseño del sistema de descompresión en el software Aspen Hysys. Realizado en la herramienta EdrawMax, 7.4, [En línea], google LLCC, 2021.

2.3.2 Diseño de la red de distribución de gas

Como primer insumo para el diseño de red es importante conocer algunos parámetros iniciales como: caudal máximo de gas requerido, presiones y temperatura de suministro de gas, presiones de operación del material de la red y de los equipos, longitud de tubería y cantidad de accesorios, caídas de presión permisibles entre punto de suministro y los artefactos a gas, gravedad específica del gas, calidad del gas y velocidad del gas en la red, que son fundamental para iniciar el caso en el software AspenHysys.

Con el objeto de realizar el trazado de la tubería se utilizará la herramienta AutoCAD para poder identificar longitudes, tipo de tubería que se necesita, el material y los accesorios que aseguren la operación y seguridad del tendido según las NTC; es importante considerar a la hora de realizar

este trazado aspectos como: terrenos inestables, áreas comunes o privadas, interferencias con redes de otros servicios, dimensiones de las vías públicas, posibilidad de daños por terceros.

Para el trazado de líneas de distribución se debe considerar la clase de localidad por las que pasan las tuberías, en vista de que señalan las limitaciones en la máxima presión de operación y para establecer la separación máxima de las válvulas de corte a la hora del diseño; los tipos de localidades se determinan según la densidad poblacional, a partir de un conteo de edificaciones en una sección de 1,600 m de largo, de la cual se tiene pensado trazar la tubería.

El calculo del mínimo espesor de la tubería depende del tipo de material, diámetro, esfuerzos y presiones, a continuación se presenta la ecuación a utilizar según el tipo de material:

Ecuación 2. *Ecuación para el calculo del espesor mínimo para tuberías de polietileno*

$$h = \frac{P \times D}{0.64 \times S + P}$$

Donde:

P: Presión máxima de diseño (psi)

h: Espeso mínimo de pared de tubo (in)

S: Esfuerzo hidrostático prolongado (psi)

D: Diámetro exterior de la tubería (in)

[14]

Ecuación 3. *Ecuación para el calculo del espesor mínimo para tuberías de acero*

$$h = \frac{P \times D}{F \times E + T(2S)}$$

Donde:

P: Presión máxima de diseño (psi)

F: Factor de diseño de acuerdo con clase de localidad.

h: Espeso mínimo de pared de tubo (in)

S: Esfuerzo hidrostático prolongado (psi)

E: Factor de eficiencia de la junta de acuerdo a clase de localidad.

D: Diámetro exterior de la tubería (in)

T: Factor de degradación por temperatura.

Existen varias ecuaciones que se emplean para ajustar los parámetros de operación de la red y deducir otros datos de la red, el uso de estas ecuaciones dependen de la presión de suministro de gas:

Ecuación 4. Ecuación de Weymouth

$$Q = 1.3124 \left(\frac{T_b}{P_b} \right) \left[\frac{(P_1^2 - P_2^2) D^{16/3}}{\gamma T L} \right]$$

Ecuación 5. Ecuación de Mueller

$$Q = 0.4937 \left(\frac{T_b}{P_b} \right) \left[\frac{(P_1^2 - P_2^2)}{T L} \right]^{0.575} \left[\frac{D^{2.725}}{\gamma^{0.425} \mu^{0.150}} \right]$$

Ecuación 6. Ecuación de Pole

$$Q = C \left[h_w \frac{D^3}{\gamma L} \right]^{0.5}$$

Donde:

Q: Tasa de flujo en MPC/h a T_b y P_b

T_b : Temperatura base en °R, normalmente se usa 520°R

P_b : Presión base en psi, normalmente 14.7 psi

P_1 : Presión de entrada (psi)

P_2 : Presión de salida (psi)

D: Diámetro interno (in)

T: Temperatura promedio del gas en el sistema en condiciones de flujo (°R)

L: Longitud de tubería (ft)

γ : Gravedad específica del gas

μ : Viscosidad del gas (lbm/s)

C: Constante según diámetro de tubería

Para el cálculo de la velocidad de cada uno de los tramos de la red, se usará la siguiente ecuación:

Ecuación 7. Ecuación velocidad del gas en la red

$$v = 353.7 \left(\frac{Q}{D^2} \right) \left(\frac{P_b}{P} \right) \left(\frac{T}{T_b} \right)$$

Donde:

Q: Caudal de gas (m³/h)

v: Velocidad del gas (m/h)

D: Diámetro interior de tubería (mm)

P_b : Presión estándar en bar, 14.7 psi

P: Presión del gas (bar)

T: Temperatura del gas (°K)

Tb: Temperatura estándar en °K, 15.5°C

Se debe contemplar que los porcentajes de pérdida de presión estén dentro de los rangos aceptables para cada uno de los tramos que conforman la red, y para ellos se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Ecuación para caídas de presión

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100\%$$

Donde:

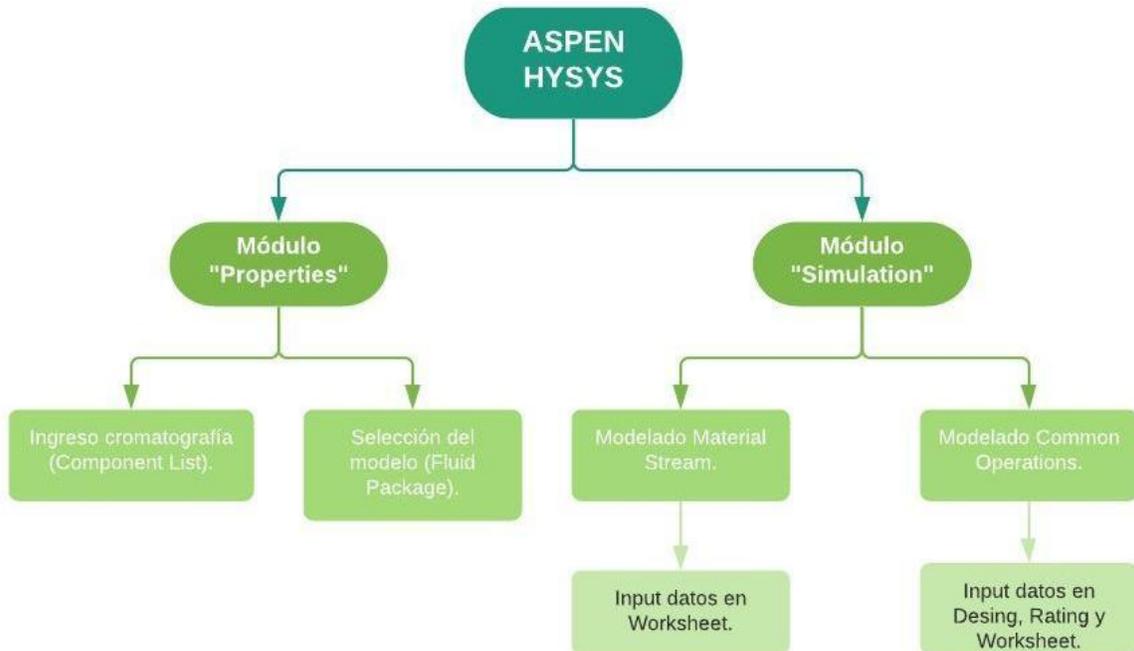
P1: Presión de entrada a la red (psi)

ΔP: Caída de presión en el tramo (psi)

P2: Presión de salida de la red (psi)

Figura 12.

Esquema general del proceso a seguir en Aspen Hysys



Nota. En el gráfico se presenta el esquema general de los pasos a seguir en el software Aspen Hysys para la realización de un modelo de simulación. Realizado en la herramienta EdrawMax, 7.4, [En línea], google LLCC, 2021.

Una vez obtenidos los parámetros iniciales, se procede a utilizar el software Aspen Hysys, el cual permite realizar el diseño de sistema, brindando la opción de testear diferentes configuraciones con el fin de optimizarlo y establecer las condiciones de operación, sin embargo, se debe tener en cuenta que a los resultados obtenidos se le debe realizar un análisis crítico, ya que no siempre se obtienen resultados fiables.

Para comenzar con el diseño de la red en esta herramienta, se tendrán en cuenta los módulos de “Properties” y “Simulation”. La primera sección mencionada es donde se ingresan los datos iniciales requeridos para realizar la simulación como son composición del gas extraído y selección del modelo. La segunda sección es la que permite hacer el modelado de las corrientes de materia, equipos y parámetros iniciales de diseño, para realizar la visualización de los perfiles.

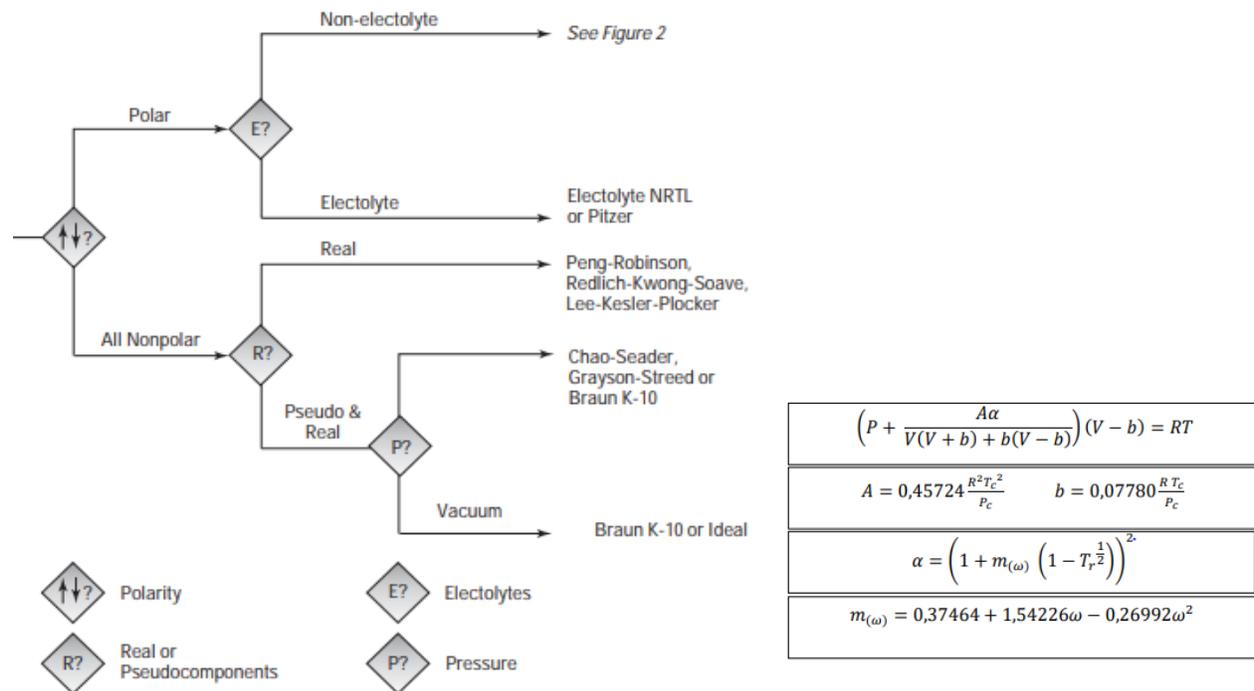
2.3.2.a. Modulo Properties. La cromatografía ingresada en la sección “Component List” corresponde a los datos presentes en la tabla 3, los cuales son suministrados por Wattle Petroleum Company S.A.S y datan del año 2017.

La selección del modelo en la sección “Fluid Package” se realiza mediante el artículo “Don’t Gamble With Physical Properties For Simulations” del autor Eric C. Carlson, en donde se hace uso de un árbol de decisión presentado en la gráfica 3, para establecer el modelo de fluido más apropiado con el cual se trabajará en esta simulación.

A partir de este árbol de decisión, se llega a la conclusión de que el más adecuado, es el modelo matemático Peng-Robinson y se presenta a continuación la ecuación del modelo matemático definido:

Figura 13.

Árbol de decisión para selección del modelo



Nota. En la gráfica se presenta el árbol de decisión estudiado que determina el modelo matemático final a utilizar en Aspen Hysys. Tomado de E.C. Carlson, (octubre 1996), Don't Gamble with Physical Properties For Simulations, Aspen Technology, Inc. [En línea]. Disponible en: <http://www.cchem.berkeley.edu/cbe150b/docs/VLE/Guidelines.pdf>

Dónde:

P : Presión (atm)

T_c : Temperatura crítica (°K)

V : Volumen (Litros)

P_c : Presión crítica (atm)

T : Temperatura (K)

T_r : Temperatura reducida (°K)

R : 0,0821 (atm L/gmol °K)

ω : Factor acéntrico del compuesto

2.3.2.b. Modulo Simulation. Dentro del módulo Simulation se encuentra el modelado de “Material Stream” y el “modelado de “Common Operations”, dentro de la primera sección se introduce información de condiciones de corriente de flujo, principalmente datos de flujo másico, el cual es requerido en cada una de las corrientes, este se determina haciendo uso de caudal de gas y densidad

ideal del gas de $0,9788 \text{ kg/m}^3$, el cual es un valor que se presenta en la tabla 4 y es información suministrada por Wattle Petroleum Company S.A.S.

En la segunda sección “Common Operations” se debe hacer uso de “Gas Pipe y Tee”, el cual es necesario para el diseño del plano de tuberías y líneas, es acá donde se suministra información de tubería como diámetro interno, externo y nominal, longitudes y selección de material de la tubería que se evaluará en la sección de resultados.

En la sección “Rating” encontramos el apartado “Heat Transfer”, acá se hará uso de la temperatura ambiente promedio de la Vereda San Roque, la cual es de $24 \text{ }^\circ\text{C}$, además, se debe hacer uso del coeficiente de transferencia de calor del material de la tubería, este se determina mediante una división entre la conductividad térmica del material (W/mK) y la longitud (m) de la sección que será simulada.

Adicionalmente en la sección “Design, Rating y Worksheet” se introduce la elevación del terreno de las zonas en las que serán instaladas los tramos de tubería, el cual se determina según el mapa topográfico de la figura 7 y con ayuda del software ArcGIS.

2.4 Estudio Financiero

Con el fin de determinar la viabilidad del proyecto se va a realizar una evaluación financiera utilizando la metodología de valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), los cuales contempla el uso de la tasa de oportunidad (TIO) y el Flujo de Caja del proyecto durante una proyección de 5 años.

Inicialmente se calculan los costos de inversión del proyecto, es decir, aquellos activos que son necesarios para poner en funcionamiento el proyecto, tales como, materiales, accesorios, mano de obra, costo de módulos, entre otros, esto en base al diseño realizado de transporte y distribución de gas planteado, este valor corresponde al valor del desembolso que la empresa debe realizar inicialmente y es el primer valor del flujo de caja.

Posteriormente se deben calcular los flujos de caja para una proyección de cinco años, esto hace referencia a las entradas y salidas netas de dinero que tiene la empresa en cada periodo de tiempo proyectado, es decir, se incluye como salidas los costos de transporte del GNC, los costos

operativos de compresión/descompresión del gas y de administración, operación y mantenimiento de las redes dentro de la vereda; como entradas se pueden considerar las tarifas de consumo según la demanda proyectada y teniendo en cuenta los subsidios del Gobierno que alivian el costo de la prestación del servicio a usuarios de estrato 1, sumado a las garantías tributarias que brinda el estado colombiano por acciones de Responsabilidad Social Empresarial (RSE).

Para el estudio se maneja una TIO de 20%, la cual es una tasa de rendimiento mínima que esperaría recibir el inversionista si se invierte en el proyecto por un periodo de tiempo. Una vez se tiene el flujo de caja para cada periodo de tiempo se calcula el VPN y la TIR utilizando las siguientes ecuaciones y criterios para la toma de decisiones:

Ecuación 9. Ecuación Valor Presente Neto

$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIO)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1 + TIO)} + \frac{F_2}{(1 + TIO)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1 + TIO)^n}$
$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1 + TIR)} + \frac{F_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1 + TIR)^n} = 0$

Donde:

Io: Inversión inicial previa

TIO: Tasa de interés de oportunidad

Ft: Flujo neto efectivo en cada periodo de tiempo

TIR: Tasa interna de retorno

n: Número de periodo

El VPN es el valor de los flujos de efectivo proyectados, descontados al presente. Los criterios de decisión según el valor obtenido del VPN se basan en lo siguiente:

- VPN > 0, la tasa de descuento elegida generará beneficios.
- VPN = 0, el proyecto de inversión no generará beneficios ni pérdidas, por lo que su realización resultará indiferente.
- VPN < 0, el proyecto de inversión generará pérdidas, por lo que deberá ser rechazado.

La TIR es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto. El criterio de selección para la toma de decisión es el siguiente:

- $TIR > TIO$, el proyecto de inversión será aceptado.
- $TIR = TIO$, la inversión podrá llevarse a cabo si mejora la posición competitiva de la empresa y no hay alternativas más favorables.
- $TIR < TIO$, el proyecto debe rechazarse.

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los datos obtenidos del estudio de mercadeo realizado, los cuales fueron importantes para la estimación de la demanda de GN actual y futura a un horizonte de predicción de 5 años; además se discute sobre el diseño del sistema virtual y se designan las características que se proponen para cada una de sus etapas para proveer de GN a la zona rural y urbana de San Roque; por último se evidencia los pasos de cómo se llevó a cabo el diseño de la red de distribución de GN y su modelamiento en la herramienta Aspen Hysys, exponiendo los respectivos resultados y análisis de datos obtenidos, por consiguiente, este capítulo compila los resultados de cada una de las etapas mencionadas en la metodología.

3.1 Estudio de mercado

Tabla 6.

Estudio de mercado zona rural

ZONA RURAL (FINCAS)				
# de fincas	Nombre	Habitantes	# De casas por finca	Distancia al Centro Poblado de San Roque (km)
1	EL REPOSO	5/2/4	3	1.95
2	EL SILENCIO	4/3/9	3	2
3	EL PROGRESO	2/2	2	0.9
4	EL PECEBRE	5	1	0.2
5	EL ORIENTE	4	1	1.72
6	EL FUTURO	3	1	1.5
7	LA ESPERANZA	5	1	3
8	PEDREGALES	5/2	2	1.41
9	CAMPO ALEGRE	5	1	0.5
10	POMAROSO	1	1	1.1
11	ALTO VIENTO	8	1	1.8
12	LA PALMERA	6	1	3
13	PIE DE CUESTA	1	1	1.3
14	SAN ISIDRO	4	1	2.7

Nota. La tabla muestra el número de fincas, casas y habitantes de la zona rural aledaña al campo cerro gordo. Realizado con información proporcionada por la empresa Wattle Petroleum Company.

Tabla 7.*Estudio de mercado zona urbana*

ZONA URBANA (Vereda San Roque)					
# CASA	HABITANTES	# CASA	HABITANTES	# CASA	HABITANTES
1	4	21	2	41	2
2	4	22	4	42	4
3	3	23	3	43	2
4	7	24	4	44	1
5	1	25	3	45	5
6	3	26	1	46	5
7	3	27	4	47	5
8	3	28	1	48	5
9	4	29	9	49	4
10	6	30	4	50	3
11	4	31	4	51	5
12	4	32	5	52	5
13	6	33	3	53	4
14	4	34	6	54	6
15	2	35	5	55	3
16	2	36	1	56	4
17	2	37	4	57	5
18	1	38	2	58	3
19	5	39	2	59	4
20	4	40	7	60	3
				61	4

Nota. La tabla muestra el número de habitantes por casa de la vereda San Roque. Realizado con información proporcionada por la empresa Wattle Petroleum Company.

Figura 14.

Tendencia de número de habitantes por finca en zona rural



Nota. Gráfica de tendencia de número de habitantes por finca en la zona rural de San Roque. Realizado con información proporcionada por la empresa Wattle Petroleum Company.

Se encontró que, en la zona rural de la vereda de San Roque, con mayor frecuencia en las fincas aledañas habitan entre 4 y 5 personas con un porcentaje de tendencia en conjunto de aproximadamente el 50% como se puede observar en la gráfica 3. Las fincas de la zona rural mencionadas en la tabla 6, se encuentra vía al casco urbano de San Roque desde el campo Cerro Gordo, y por tanto no manejan distancias mayores a los 3 km.

Figura 15.

Tendencia de número de habitantes por vivienda en zona urbana



Nota. Gráfica de tendencia de número de habitantes por vivienda en la zona urbana de San Roque. Realizado con información proporcionada por la empresa Wattle Petroleum Company.

En cuanto al casco urbano de San Roque, se observa según los resultados que en estas viviendas, la tasa más representativa de habitantes por casa, es de entre 3 a 4 personas, siendo esta cantidad la media de los datos obtenidos. Según datos proporcionados por la empresa WPC, el perímetro de la zona poblada o caso urbano de San Roque es de aproximadamente 600m.

Según el estudio realizado las viviendas ubicadas en la Vereda y las zonas aledañas corresponden en su mayoría a estrato 1, en donde, actualmente hacen uso de la leña como combustible para cocción de sus alimentos o se transportan hasta Sardinata en busca de las pimpinas de gas, recorrido que demora aproximadamente 1h, lo cual lo tienen que realizar cada vez que necesiten abastecerse de combustible para sus actividades domésticas.

Durante las operaciones de WATTLE PETROLEUM COMPANY en el campo Cerro Gordo, los habitantes han manifestado la necesidad de adquirir el servicio de Gas Natural, en vista que el uso de la leña como combustible es dañina para la salud originando enfermedades pulmonares, degradación visual y problemas cardiacos, y en algunos otros habitantes por la inconformidad de tener que transportarse para conseguir el combustible.

3.2 Estimación de la demanda de GN

Con la información obtenida en la tabla 7 del estudio de mercado y aplicando la *ecuación 1* para el consumo de gas en la vereda San Roque, obtenemos que, para las 61 viviendas, la demanda actual de gas es de 915m^3 de gas. Para la zona rural, se había presentado en la tabla 6 el número de fincas que se encontraban, sin embargo, se puede observar que en algunas fincas hay más de una vivienda, por tanto, se utilizará para el cálculo, el número total de viviendas en el total de las fincas, obteniendo, para las 20 viviendas, la demanda actual es de 300m^3 de gas. Entonces, tenemos que la demanda total actual de gas natural en la zona de influencia de la propuesta de la red de distribución de gas es de **$1,215\text{m}^3$** , resultado obtenido a partir de la suma de la demanda de San Roque y Zona Rural.

En las tablas 6 y 7 se presentan el número de habitantes de la zona rural y urbana de San Roque, los cuales son, 80 y 228 habitantes respectivamente, con un total de 308 personas. Aplicando la tasa de crecimiento anual presentada en la metodología, obtenemos que el crecimiento poblacional es de 6 personas anualmente, y por tanto para una proyección de 5 años, el número de habitantes

es de 338. Considerando que son aproximadamente de 3 a 4 personas por vivienda, aplicamos la *ecuación 1* y obtenemos la demanda proyectada para toda la zona de influencia:

$$\text{Demanda Proyectada a 5 años: } \frac{15m^3}{\text{vivienda}} \times 90 \text{ viviendas} = 1350m^3$$

Tabla 8.

Demanda de gas natural

Concepto	Valor	Unidad
Demanda de gas mensual	1,350	m ³ /mes
Factor de seguridad	30	%
Demanda total de gas + Factor de Seguridad	1,755	m ³ /mes

Nota. La tabla muestra la demanda de gas teniendo en cuenta el factor de seguridad para el diseño. Realizado con información proporcionada por la empresa Wattle Petroleum Company y bibliografía.

3.3 Diseño del sistema de gasoducto virtual

Como se discutió en el marco teórico, el uso de la técnica de gasoducto virtual se utiliza como una alternativa de suministro para aquellas poblaciones pequeñas que por su infraestructura y demanda, requieren de sistemas de transporte menos convencionales. En esta técnica, se realizan 3 etapas: compresión, transporte y descompresión.

El gas extraído de los pozos CG-1 y CG-5 una vez tratados en las facilidades de superficie en donde se separara el gas de los condensados y se remueve la humedad del gas de 100 lb_{H2O}/MSCFD a 6 lb_{H2O}/MSCFD para cumplir con las especificaciones del RUT y asegurar la integridad de los equipos a utilizarse en las siguientes etapas y del gasoducto que lleva el gas hasta la planta La Florida, lugar en donde se procede con la primera etapa, la compresión, aquí actualmente se tienen los equipos e instalaciones específicas diseñadas para tomar el gas del gasoducto cumpliendo con los requisitos establecidos en la NTC 5897 para las estaciones de carga. Aquí mediante un sistema de compresión, se aumenta la presión del gas a 3,000 psi y 120°F, esto con el fin de reducir su volumen e iniciar el proceso de cargue de módulos y poder ser transportado a través de camiones por vía terrestre a la cabecera de la Vereda San Roque.

El transporte se realizará a través de módulos, los cuales son diseñados para que sean transportables, desmontables e intercambiables del camión que los transporta. Estos consisten en un conjunto de cilindros de acero sin costura conectados a un colector por medio de válvulas que permiten el llenado y vaciado de los cilindros.

Conforme al documento CREG-048 de la Comisión de Regulación de energía y gas, para poblaciones cuyas demandas diarias son menores a los 1,500 m³, es más viable y económico usar camiones rígidos estándares de 2, 3 o 4 ejes, los cuales pueden transportar de 1 a 5 módulos con capacidad de 300m³. Dado que con el estudio de mercado realizado obtuvimos que la demanda diaria de gas en esta zona es muy pequeña, se propone utilizar para el transporte, camiones rígidos que transporten 1 módulo de capacidad de 300m³ con sus respectivos accesorios, lo que establece que cada 5 días se abastecerá nuevamente de GNC para satisfacer la demanda mensual.

Estos viajes mensuales se consideraron así, en vista de que la distancia entre el punto de compresión hasta la estación de descompresión no es grande, y por lo tanto no es comparable los costos de combustible, lubricantes, reparaciones u otros imprevistos durante el transporte a los costos que se tendrían en administración, operación y almacenaje en la estación de consumo.

Tabla 9.

Diseño del sistema de transporte de GNC

Concepto	Valor	Unidad
Tipo de camión	Rígido	-
Número de módulos por camión	1	-
Capacidad de módulos	300	m ³
Trayectos mensuales	6	-

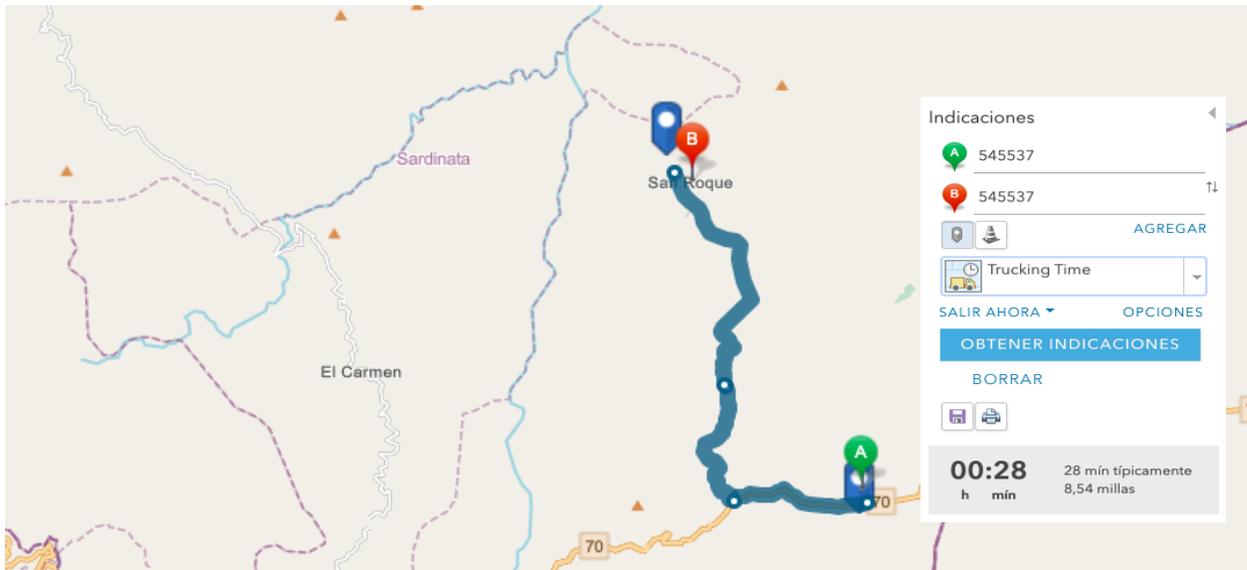
Nota. La tabla muestra el resumen de las características del sistema de transporte de GNC a la Vereda San Roque.

La ruta que va a llevar a cabo el camión utilizado para el transporte, esta esquematizada en la anterior figura, en donde se evidencia el punto de partida o zona de carga (Planta La Florida) que se denomina con la letra **A**, hasta la zona de consumo o punto de descompresión (Vereda San Roque) caracterizado con la letra **B**. El recorrido es de 8.54 millas, es decir, alrededor de los 13 km, con una duración de 30 minutos aproximadamente, debido a que esto dependerá del flujo de

transporte pesado, inclinación y estado de la vía. El recorrido del gasoducto virtual empieza desde punto de cargue, planta La Florida, viajando al oeste por la ruta 70 Ocaña-Cúcuta se recorre una distancia aproximada de 2.10 millas para posteriormente girar a la derecha y seguir de recto una distancia de 2.27 millas, pasando por la Vereda El Rubí y a unas 0.03 millas girar a la derecha y recorrer 4.14 millas hasta llegar a la Vereda San Roque.

Figura 16.

Recorrido del módulo de GNC por camiones



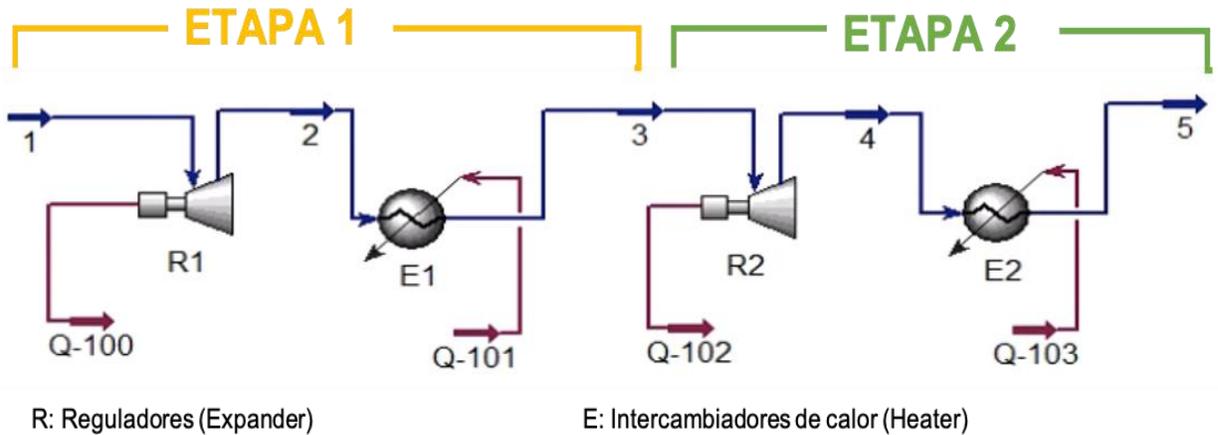
Nota. La figura muestra la ruta que llevaran a cabo los camiones para el transporte del GNC de la planta La Florida a San Roque. Realizado en software ArcGIS., 7.4, [En línea], google LLCC, 2021.

Finalmente, se realiza la recepción del gas en el centro de descompresión, la cual debe estar ubicada en las proximidades de la cabecera de San Roque, considerando que la estación debe estar a una distancia mínima de 15 m de las construcciones y del borde de la vía pública, y el punto de descarga debe encontrarse a 2.5 m del descompresor. En esta estación se reduce la presión del gas hasta 80 psi para expandirlo y se adecua el gas para posteriormente inyectarlo a la red de distribución para llevarlo hasta los usuarios finales y cumplir con las especificaciones técnicas.

En la figura 17 se puede observar el PFD propuesto para este sistema y en el anexo 1 se puede observar el paso a paso de como se realizó esta construcción en la herramienta Aspen Hysys, con los pantallazos que se realizaron durante la simulación:

Figura 17.

PFD de la Estación de Regulación



Nota. La figura muestra el diagrama del sistema de descompresión. Realizada en el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

A continuación, se presentan las tablas de resultados e información del sistema que fueron extraídos de Aspen Hysys en unidades de campo, indicando en **color azul** los datos que se proporcionaron a la herramienta para realizar el modelo y en **color negro** los calculados por el software:

Tabla 10.

Datos de las corrientes de materia

Case - Material Stream					
Name	1	2	3	4	5
Pressure [psia]	3000	1500	1000	270	80
Temperature [°F]	120,002	55,67	159,7	48,51	86,000
Mass Flow [lb/h]	5,374	5,374	5,374	5,374	5,374
Vapor / Phase Fraction	1,000	0,9597	0,99	0,9811	0,9974

Nota. La tabla muestra los resultados de los parámetros de cada una de las corrientes de materia del caso trabajado del sistema de descompresión. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Tabla 11.*Datos de los reguladores*

Expander		
Name	R1	R2
Power [hp]	0,038	0,095
Adiabatic Efficiency	75,000	75,000
Polytropic Efficiency	73,673	72,708
Delta P [psi]	1500,000	730,000

Nota. La tabla muestra los resultados de los parámetros de los dos reguladores modelados en el caso trabajado del sistema de descompresión. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Tabla 12.*Datos de los calentadores*

Heater		
Name	E1	E2
Duty [Btu/h]	517,516	186,178
Pressure Drop [psi]	500	190

Nota. La tabla muestra los resultados de los parámetros de los dos calentadores modelados en el caso trabajado del sistema de descompresión. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Como se observa para la reducción de la presión y expansión de gas, el sistema de descompresión se realiza en dos etapas, compuesta cada una por un regulador y un intercambiador de calor, siendo los reguladores los encargados de expandir el gas en grandes cantidades, como se observa en la tabla 11 con las altas caídas de presión que se ocasionan en estas unidades. También se observa que los equipos de calentamiento compensan el enfriamiento que se presenta con la expansión del GN en los reguladores, aumentando la temperatura del gas como se observa en las corrientes 3 y 5 de la tabla 10, y apoyando en la caída de presión, sin embargo, no son comparables con las reducciones ocasionadas en los reguladores como se observa en la tabla 12. En los resultados obtenidos de tala tabla 10, observamos que el gas natural (Corriente 5) saldría a una temperatura de 30°C con una presión de 80 psi a la red de distribución de San Roque.

3.4 Diseño de la red de distribución de gas natural

3.4.1 Trazado, características de tubería y accesorios

El trazado de tubería de GN fue desarrollado con ayuda de la herramienta AutoCAD, permitiendo tener la medida exacta de cada tipo de tubería, en vista de que el software lleva las dimensiones del plano digitalizado a escala 1:1. Este diseño se puede visualizar en el Anexo 2 con sus respectivas convenciones y accesorios, y los datos obtenidos para la zona urbana y rural se pueden observar en la Tabla 13 y 14 respectivamente.

La red de distribución diseñada esta compuesta inicialmente por una línea secundaria de tubería denominada troncal que se ubica únicamente por la vía pública de la vereda y va desde la estación reguladora, City Gate, hasta los anillos que se conectan entre sí formando una red cerrada, estas líneas son las encargadas de transportar el gas dentro del centro poblado a las acometidas de cada usuario de San Roque; en cuanto al trazado de la tubería para la distribución de GN a las fincas se parte de otra troncal o línea secundaria, que inicia desde la misma estación reguladora, viajando por la vía pública de acceso al Campo Cerro Gordo y finalizando en la acometida de la última vivienda ubicada a 3 km del centro poblado.

Para la selección del material de la tubería se consideraron aspectos como tipo de línea de transporte, características de fluido, presiones, temperaturas de operación y cargas adicionales (esfuerzos por asentamientos o derrumbes, cruces de vías, cargas vivas y muertas, contracción y expansión, etc.). Según las NTC 3728 las líneas secundarias, es decir, líneas desde la salida de la estación reguladora del sector, que se conoce como la estación City Gate, hasta las líneas de acometida, que son aquellas que van desde estas líneas secundarias hasta la válvula de corte individual de consumo, se componen de materiales plásticos operadas a media presión.

Siguiendo las recomendaciones de la norma y las consideraciones mencionadas anteriormente, se propone que la tubería sea de polietileno de mediana densidad (PEMD), debido a que la presión de suministro no excede los 100 psi, es altamente resistente a agentes agresivos externos, al calor y agrietamiento, tiene alta capacidad de elongación, flexibilidad, impermeabilidad, además por su economía y facilidad de transporte; las líneas deben instalarse a profundidad no inferior a 60cm en vías si son enterradas pero si se instalan superficialmente deben estar provistas de camisas o

elementos que la protejan de daños y las líneas de acometida deben instalarse a una profundidad no inferior a 50cm.

Tabla 13.

Características de tubería del Centro Poblado de San Roque

Tipo de línea	Concepto	Material / Grado	Diámetro Nominal	Diámetro Exterior (in)	Espesor min de pared (in)	Longitud Total (m)
Líneas secundarias	Troncal	PEMD / PE80	1"	1.31	0.098	90.31
	Anillos de distribución	PEMD / PE80	¾"	1.05	0.079	589.60
Líneas de acometida	Acometidas	PEMD / PE80	½"	0.84	0.063	91.50

Nota. La tabla muestra el resumen de las características para cada tipo de tubería a utilizar en la propuesta para el centro poblado de San Roque. Realizada con información proporcionada por el programa AutoCad, Autodesk Inc, 2022.

Tabla 14.

Características de tubería de zona rural de San Roque

Tipo de línea	Concepto	Material / Grado	Diámetro Nominal	Diámetro Exterior (in)	Espesor min de pared (in)	Longitud Total (m)
Líneas secundarias	Líneas rurales	PEMD / PE80	1"	1.31	0.098	3,000
Líneas de acometida	Acometidas	PEMD / PE80	½"	0.84	0.063	28

Nota. La tabla muestra el resumen de las características para cada tipo de tubería a utilizar en la propuesta para las zonas rurales de San Roque. Realizada con información proporcionada por el programa AutoCad, Autodesk Inc, 2022.

Como se dispuso en la metodología, es importante considerar la clase de localidad del sector con la información dispuesta en la NTC 3728, para el caso de nuestro proyecto, se puede evidenciar con ayuda del Anexo 2, que el centro poblado de San Roque corresponde a localidad clase 2 y las zonas aledañas o rurales donde se encuentran algunas fincas corresponden a localidad clase 1.

Una vez establecido la localidad y el material, se procedió a calcular el espesor mínimo de pared de cada tramo de tubería, utilizando la *ecuación 2* por ser tuberías de PE, datos observados en las anteriores tablas.

Las válvulas son accesorios para tener acceso y control al flujo de gas, además brindan seguridad a la red en casos de emergencia durante la operación, en este proyecto estos accesorios fueron diseñadas siguiendo con lo estipulado en la NTC 3728, que resume que deben estar en un lugar de fácil acceso con el fin de reducir el tiempo de intervención, deben estar protegidas de daños y de manipulación por personas no autorizadas y por la clase de localidad de la vereda tienen que estar separadas unas de otras a una distancia máxima de 24 km para localidad 2 y de 32 km para localidad 1.

En el diseño se proponen tres tipos de válvulas: las de seccionamiento y control que se utilizan en las líneas secundarias para aislar uno o varios tramos de la red en casos de imprevistos, dichas válvulas están concebidas para estar completamente abiertas o completamente cerradas, una válvula divisora de tres vías que permite desviar el flujo del GN total o parcialmente a otras tuberías y las válvulas de corte individual con accionamiento manual ubicadas en las acometidas, donde según la NTC 2525 son requeridas en estas secciones para la regulación del gas a cada punto de consumo. También se contara con reductores de diámetro, en vista de que existen tres diámetros diferentes en todo el diseño de la red, y por último las uniones mecánicas denominadas codos, compatibles con el material, que se instalan entre dos longitudes de un tubo para permitir un cambio de dirección.

Tabla 15.

Válvulas y accesorios del tendido de red

Sector	Ubicación	Accesorio	Cantidad
Centro Poblado	Troncal	Válvula de seccionamiento	1
		Codo 1"	2
		Reductor de diámetro 1" - ¾"	1
	Anillo de distribución	Válvula de control	2
		Codo ¾"	14
		Reductor de diámetro ¾" - ½"	61
Zona Rural	Línea de acometida	Válvula de corte individual	61
	Líneas rurales	Válvula de seccionamiento	1
		Codo 1"	15
		Reductor de diámetro 1" - ½"	14
	Línea de acometida	Válvula de corte individual	14

Nota. La tabla muestra el resumen de la cantidad de accesorios necesarios para cada tipo de tubería a utilizar en la propuesta. Realizada con información proporcionada por el programa AutoCad, Autodesk Inc, 2022.

3.4.2 Parámetros iniciales

Las redes de distribución de gas deben diseñarse garantizando su vida útil, volumen y presión de gas adecuados a las necesidades de cada consumidor [16]. En esta sección se presenta el resumen de los datos mínimos requeridos para poder iniciar con el modelamiento de la red en Aspen Hysys, información que ha sido obtenida a partir del estudio y cálculos realizados hasta el momento en las secciones anteriores, y que de acuerdo a la metodología planteada.

Tabla 16.

Especificaciones del fluido GN

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente / Ecuación
Tipo de Fluido	GN	-	Empresa WPC
Densidad de fluido (ρ)	0.9788	Kg/m ³	Empresa WPC
Caudal de fluido (Q)	2.4375	m ³ /h	Aspen HYSYS Tabla 8
Flujo másico (m)	5.374	lb/h	Aspen HYSYS Tabla 10

Nota. La tabla muestra los datos de los parámetros iniciales del GN para iniciar con el diseño de la red y referencia de las ecuaciones con las que se obtuvieron o fuente de información.

Tabla 17.

Especificaciones termodinámicas de entrada para la línea troncal y rural

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente / Ecuación
Temperatura de suministro (T_i)	86	°F	Aspen HYSYS Tabla 10
Presión de suministro (P_i)	80	psi	Aspen HYSYS Tabla 10
Temperatura ambiente	24	°C	Fuente bibliográfica

Nota. La tabla muestra los datos de los parámetros iniciales termodinámicos para iniciar con el diseño de la red y referencia de las ecuaciones con las que se obtuvieron o fuente de información.

De acuerdo al trazado de tubería realizado en el Anexo 2, se puede observar que parte del gas se direcciona a través de la troncal al centro poblado y la otra parte a la zona rural por la línea secundaria, el porcentaje de flujo másico que va a transportar cada línea se determina según el número de viviendas en cada zona, estos datos se presentan en la siguiente tabla y son de interés para la construcción de cada tramo de tubería, adicionalmente se muestra los valores de la longitud más detallados con respecto a lo expuesto en las tablas 13 y 14.

Tabla 18.*Especificaciones para cada tramo de tubería*

Sector	Concepto	Longitud individual (m)	Flujo másico (lb/h)
	Troncal	90.31	4.371
	Anillo-1	271.1	4.371
Centro Poblado	Acometida Anillo-1	48.0	2.293
	Anillo-2	318.5	2.078
	Acometida Anillo-2	43.50	2.078
Zona Rural	Línea rural	3,000	1.003
	Acometida	28.0	1.003

Nota. La tabla muestra los datos de longitudes individuales y flujo másico para cada tramo de tubería en cada sector.

3.4.3 Modelamiento en Aspen HYSYS

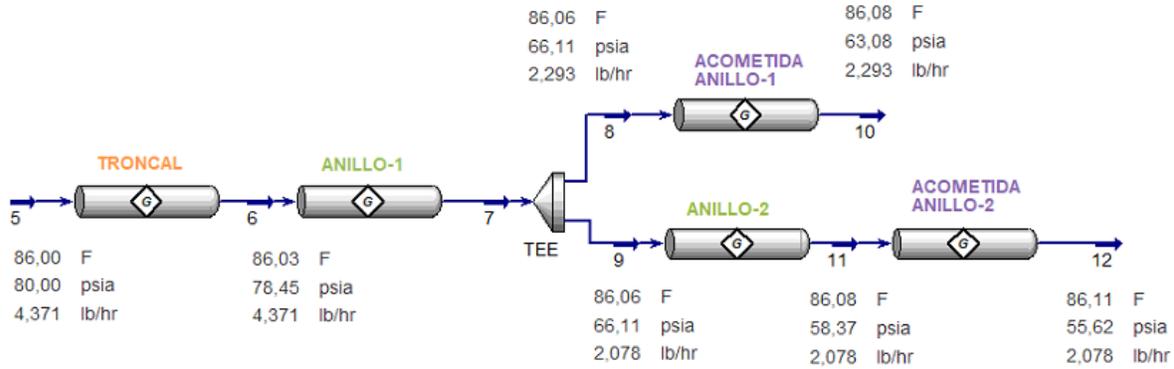
En esta sección se presenta el modelamiento de la red de distribución de GN del centro poblado y la zona rural de San Roque, los cuales fueron realizados en la herramienta Aspen Hysys y diseñados con los datos de los parámetros iniciales y con las pautas que se estipularon en el trazado de la tubería, en el Anexo 3 se puede visualizar el paso a paso realizado en el software para obtener los modelados finales observados en las figuras 18 y 29.

Adicionalmente se encuentra el análisis de resultados arrojados por la herramienta mediante gráficas y tablas, en donde se evalúan parámetros como presión, temperatura, velocidad, flujos másicos u otros a través de toda la longitud de cada sección de tubería utilizadas en la red.

Es importante aclarar que para el diseño se consideró un sistema adiabático, es decir, que no hay transferencia de calor, sin embargo, en la tabla 19 de resultados se observa que existe un cambio mínimo en la temperatura del fluido durante su transporte por la red, esta variación no afecta el rendimiento del gas por lo que es muy pequeño el cambio y puede deberse por ser una tubería enterrada.

Figura 18.

Diseño de la red de distribución de GN para el Centro Poblado



Nota. La figura muestra el diseño de distribución de GN para el centro poblado de San Roque. Tomado de la simulación realizado en el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Tabla 19.

Resultados de las corrientes de materia en la red de la zona urbana

Name	Case - Material Stream								
	5	6	7	8	9	10	11	12	
Pressure [psia]	80,000	78,449	66,114	66,114	66,114	63,077	58,371	55,622	
Temperature [F]	86,000	86,028	86,056	86,056	86,056	86,084	86,084	86,111	
Mass Flow [lb/hr]	4,371	4,371	4,371	2,292	2,078	2,292	2,078	2,078	
Std Ideal Liq Vol Flow [USGPM]	0,021	0,021	0,021	0,011	0,010	0,011	0,010	0,010	
Vapor / Phase Fraction	0,944	0,944	0,949	0,949	0,949	0,951	0,953	0,954	

Nota. La tabla muestra los resultados de los parámetros de cada una de las corrientes de materia del diseño de la red de la zona urbana de San Roque. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

En la tabla 19 se pueden observar las presiones de trabajo calculadas por el software para cada una de las corrientes del diseño, estas presiones de operación cumplen con los criterios generales de especificación para los sistemas de tuberías que se utilizan para el transporte, distribución y suministro consideradas en la NTC 3838, en donde se establece que para un sistema de tubería de media presión, las líneas secundarias, líneas de acometida y líneas matrices exteriores a las

edificaciones no deben sobrepasar los 101.5 psia, por tanto, hasta el momento del análisis el diseño propuesto cumple con los requisitos establecidos.

También observamos que existe un cambio pequeño en la fracción de vapor del fluido, evidenciando un ascenso en sus valores, este incremento puede ser producidas por los cambios de diámetro durante el transporte del GN, por lo que al tener un menor espacio las moléculas del fluido empiezan a chocar más frecuentemente y obedecen a distribución de Maxwell-Boltzmann, existiendo que se muevan con suficiente velocidad como para escapar de la fracción de líquido existente, mejorando el rendimiento del gas.

Tabla 20.

Resultados de los tramos de tubería de la red de la zona urbana

Compressible Gas Pipe					
Name	TRONCAL	ANILLO-1	ACOMETIDA ANILLO-1	ANILLO-2	ACOMETIDA ANILLO-2
Pressure Drop [psi]	1,550	12,34	3,037	7,743	2,749
Heat Transfer Coefficient [Btu/hr.ft ² .F]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Maximum Pressure [psia]	80,000	78,450	66,11	66,11	58,37
Maximum Velocity [ft/s]	0,391	0,722	0,6207	0,3892	0,638
Nominal Diameter [in]	1,000	0,750	0,500	0,750	0,500
External Diameter [in]	1,310	1,050	0,840	1,050	0,840
Internal Diameter [in]	1,212	0,971	0,777	0,971	0,777
Roughness [in]	0,00055	0,00055	0,00055	0,00055	0,00055

Nota. La tabla muestra los resultados de algunos parámetros de cada tramo de tubería del diseño de la red de la zona urbana de San Roque. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

En la tabla 20 se observa que existe una pérdida de carga en las tuberías que transportan el GN, esta pérdida de presión normalmente se debe a la fricción de las partículas del fluido con las paredes de la tubería y por obstáculos o accesorios que se encuentren durante la conducción a través de esta; la hora de realizar un diseño, este es uno de los factores más importantes que es necesario controlar, en vista de que las altas caídas de presión afectan el rendimiento de la red de distribución.

Según los resultados arrojados por el software, las caídas de presión más altas son en los tramos de los anillos de distribución, lo que es perfectamente entendible por lo que son los tramos de tubería con mayores longitudes en toda la red, y según la teoría mayores longitudes se traducen en mayores pérdidas de carga, sin embargo, si se comparan las longitudes del anillo-1 y el anillo-2 en la tabla 8, con este concepto se podría inferir que existiría mayor caída de presión en el anillo-2 por tener una longitud mayor, pero al observar los resultados se encuentra que la mayor caída de presión se presenta en el anillo-1, esto es debido a que existe un valor más alto para el flujo másico en este tramo de tubería como se observa en la tabla 19 y por tanto el caudal que circula es otro de las variables que intervienen en el comportamiento de la caída de presión, a mayor caudal, mayor caída de carga.

La red de distribución para la zona urbana inicia con la construcción de la troncal que conduce el gas desde el City Gate hasta el centro poblado para determinar automáticamente las propiedades y condiciones del fluido a la llegada al anillo-1 de distribución (Corriente 6), en donde la tubería pasa de ser de 1” a 3/4”. Como se puede observar en la figura 18 y en la tabla 20, el gas entra a la troncal a una presión de 80 psia y sale a una presión de 78.45 psia, observando que la caída de presión en este tramo de tubería es insignificante.

Tabla 21.

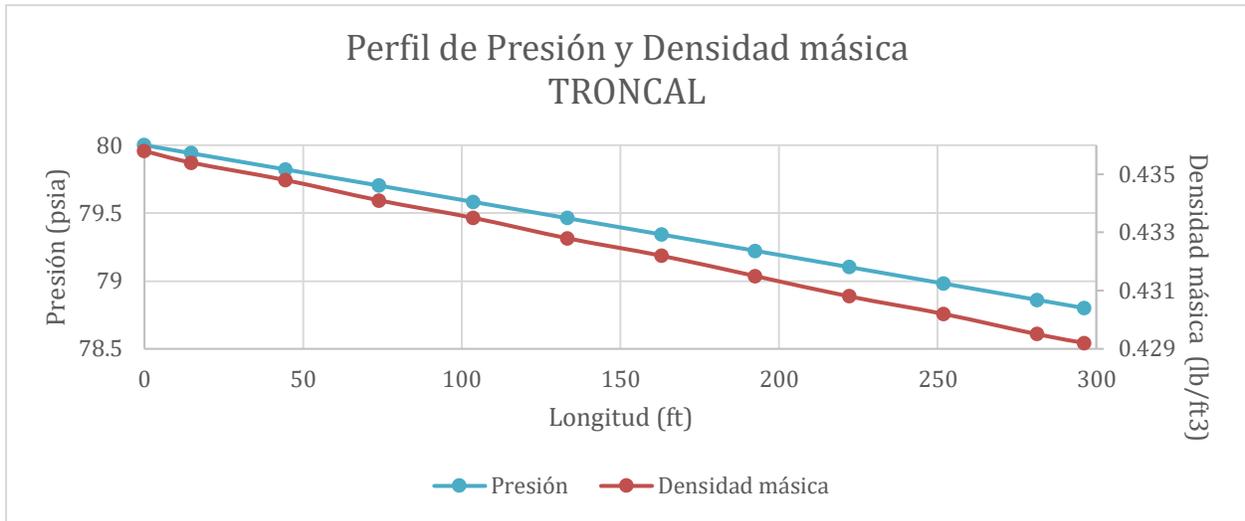
Profile View de la troncal del centro poblado

Axial Length [ft]	Pressure [psia]	Temperature [F]	Mass Flow [lb/hr]	Velocity [ft/s]	Mach Number	Mass Density [lb/ft3]	Internal Energy [Btu/lb]	Enthalpy [Btu/lb]
0,00000	80,0000	86,0000	4	0,38	0,0004	0,3953	212,309	249,760
14,815	79,9232	86,0014	4	0,38	0,0004	0,3949	212,309	249,760
44,444	79,7694	86,0042	4	0,38	0,0004	0,3941	212,311	249,762
74,073	79,6154	86,0070	4	0,39	0,0004	0,3934	212,312	249,763
103,70	79,4610	86,0098	4	0,39	0,0004	0,3926	212,313	249,764
133,33	79,3063	86,0126	4	0,39	0,0004	0,3919	212,314	249,765
162,96	79,1513	86,0154	4	0,39	0,0004	0,3911	212,315	249,767
192,59	78,9960	86,0183	4	0,39	0,0004	0,3903	212,316	249,768
222,22	78,8403	86,0211	4	0,39	0,0004	0,3895	212,317	249,769
251,85	78,6843	86,0239	4	0,39	0,0004	0,3888	212,318	249,771
281,48	78,5281	86,0267	4	0,39	0,0004	0,3880	212,319	249,772
296,29	78,4498	86,0281	4	0,39	0,0004	0,3876	212,320	249,772

Nota. La tabla muestra los resultados de los parámetros calculados por el software en función de la longitud del tramo de la troncal del centro poblado. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Figura 19.

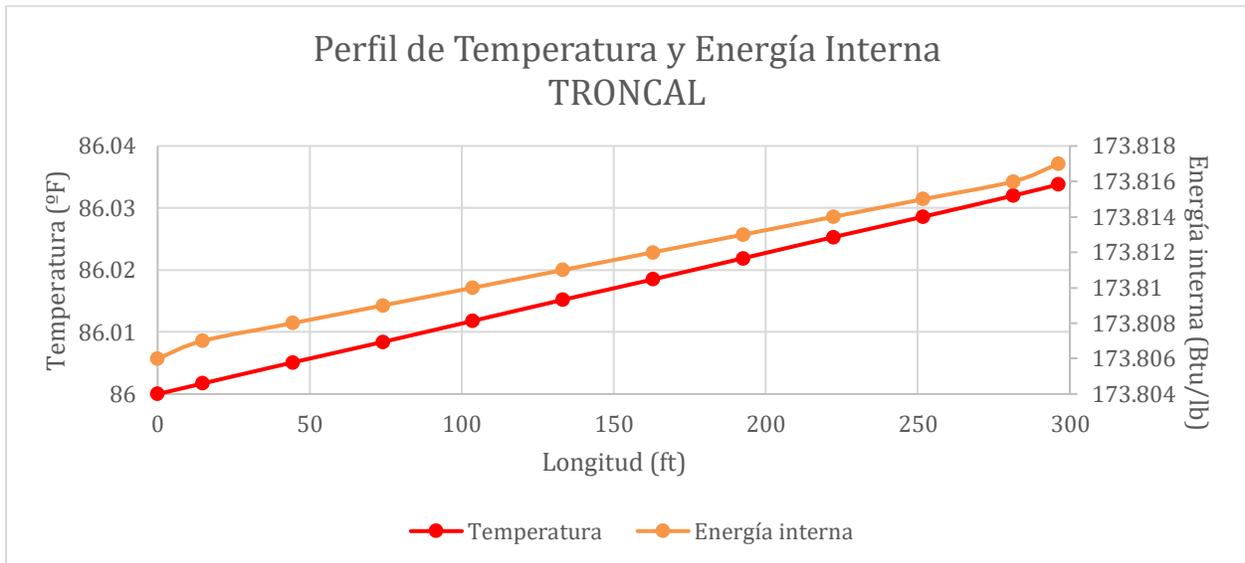
Perfil de Presión y Densidad Másica vs. Longitud de la línea troncal



Nota. La gráfica muestra el perfil de declinación de la presión y densidad másica en función de la longitud de la troncal, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Figura 20.

Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud de la troncal



Nota. La gráfica muestra el perfil de ascensión de la temperatura y energía interna del GN en función de la longitud de la troncal, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Teniendo el valor de las presiones y temperatura de llegada al primer anillo de distribución, se realiza la simulación de la siguiente sección con tubería de ¾” por medio de una reducción de diámetro, para finalmente determinar las condiciones de salida del anillo-1 (Corriente7).

Tabla 22.

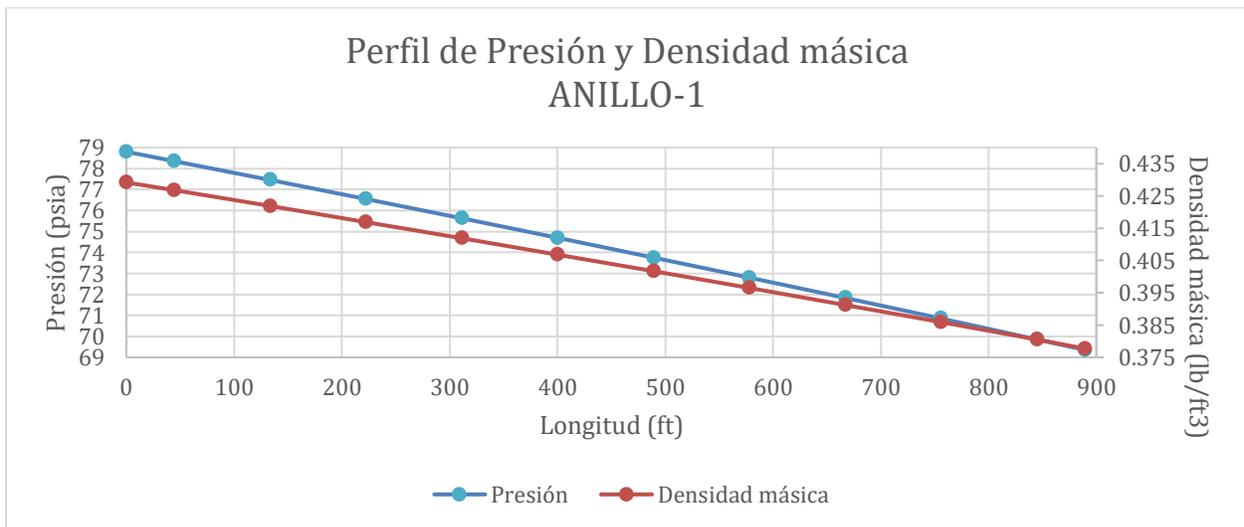
Profile View del anillo-1 del centro poblado

Axial Length [ft]	Pressure [psia]	Temperature [F]	Mass Flow [lb/hr]	Velocity [ft/s]	Mach Number	Mass Density [lb/ft3]	Internal Energy [Btu/lb]	Enthalpy [Btu/lb]
0,00000	78,4498	86,0281	4	0,61	0,0006	0,3876	212,958	250,411
44,472	77,8776	86,0295	4	0,61	0,0006	0,3848	212,958	250,411
133,42	76,7244	86,0323	4	0,62	0,0006	0,3791	212,960	250,413
222,36	75,5535	86,0351	4	0,63	0,0006	0,3733	212,961	250,414
311,30	74,3641	86,0379	4	0,64	0,0006	0,3674	212,962	250,415
400,25	73,1552	86,0407	4	0,65	0,0006	0,3614	212,963	250,416
489,19	71,9260	86,0435	4	0,66	0,0006	0,3554	212,964	250,418
578,13	70,6753	86,0463	4	0,68	0,0006	0,3492	212,965	250,419
667,08	69,4019	86,0491	4	0,69	0,0007	0,3429	212,966	250,420
756,02	68,1046	86,0519	4	0,70	0,0007	0,3365	212,967	250,422
844,96	66,7821	86,0547	4	0,72	0,0007	0,3299	212,968	250,423
889,44	66,1143	86,0561	4	0,72	0,0007	0,3266	212,969	250,423

Nota. La tabla muestra los resultados de los parámetros calculados por el software en función de la longitud del anillo-1 del centro poblado. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Figura 21.

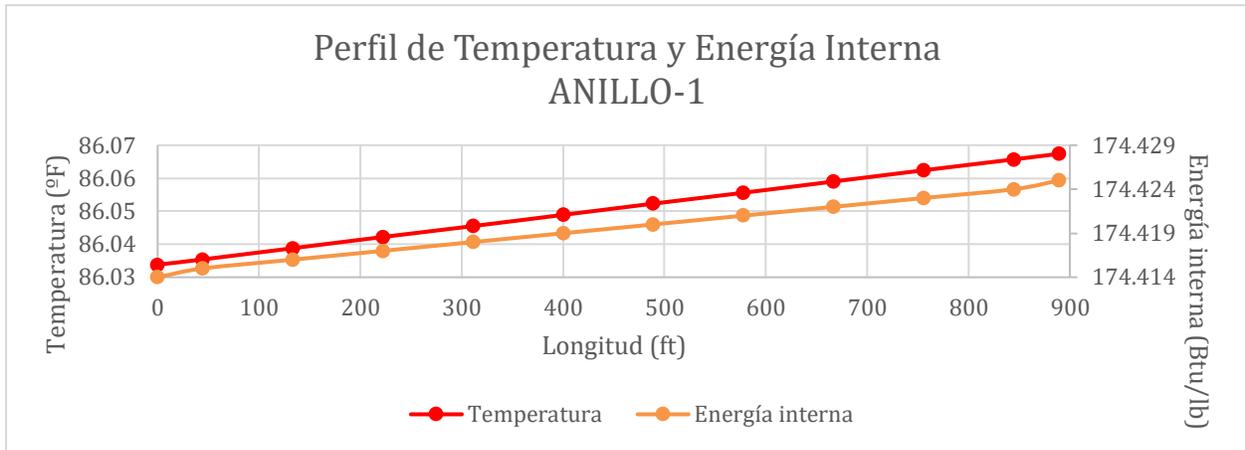
Perfil de Presión y Densidad Másica vs. Longitud de anillo-1



Nota. La gráfica muestra el perfil de declinación de la presión y densidad másica en función de la longitud del anillo-1, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Figura 22.

Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud del anillo-1



Nota. La gráfica muestra el perfil de ascensión de la temperatura y energía interna del GN en función de la longitud del anillo-1, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

A la salida del anillo-1, el 52.46% del GN transportado va hacia las acometidas del anillo-1 (Corriente 8), cuyas líneas con un cambio de diámetro a 1/2” proveen de gas a las primeras 32 viviendas (Corriente 10) del centro poblado, el 47.54% restante va hacia el anillo-2 (Corriente 9), en donde no hay un cambio de diámetro por ser el mismo tipo de tubería pero si hay una variación en la longitud.

Tabla 23.

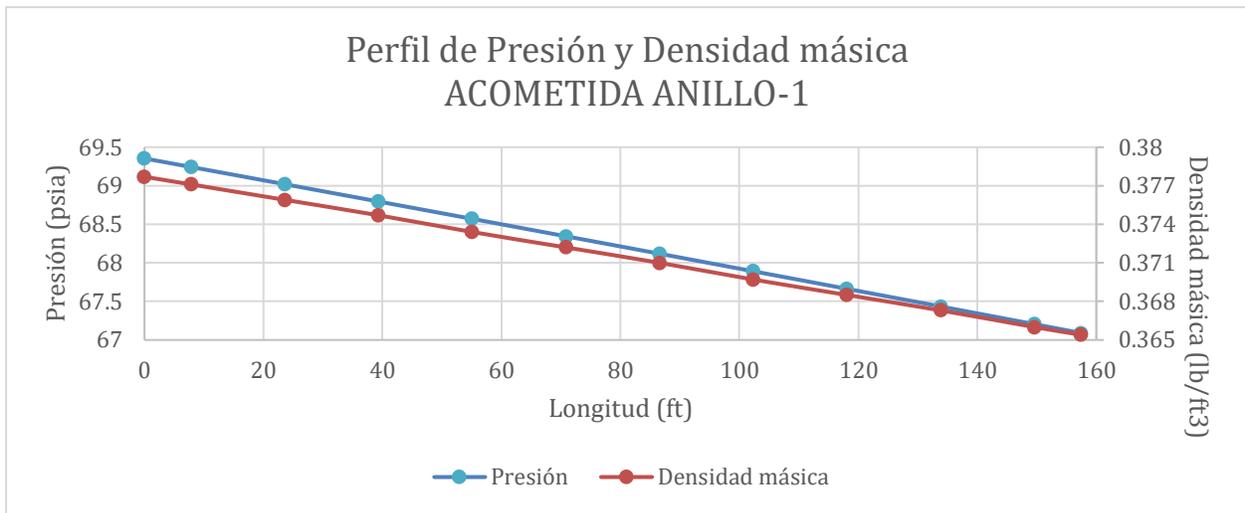
Profile View de las acometidas del anillo-1 del centro poblado

Axial Length [ft]	Pressure [psia]	Temperature [F]	Mass Flow [lb/hr]	Velocity [ft/s]	Mach Number	Mass Density [lb/ft3]	Internal Energy [Btu/lb]	Enthalpy [Btu/lb]
0,00000	66,1143	86,0561	2	0,59	0,0006	0,3266	213,608	251,062
7,8740	65,9656	86,0575	2	0,59	0,0006	0,3259	213,608	251,063
23,622	65,6677	86,0603	2	0,60	0,0006	0,3244	213,609	251,064
39,370	65,3684	86,0631	2	0,60	0,0006	0,3230	213,610	251,065
55,118	65,0676	86,0659	2	0,60	0,0006	0,3215	213,611	251,067
70,866	64,7655	86,0687	2	0,60	0,0006	0,3200	213,612	251,068
86,614	64,4619	86,0715	2	0,61	0,0006	0,3185	213,614	251,069
102,36	64,1569	86,0743	2	0,61	0,0006	0,3170	213,615	251,071
118,11	63,8504	86,0770	2	0,61	0,0006	0,3154	213,616	251,072
133,86	63,5424	86,0798	2	0,62	0,0006	0,3139	213,617	251,073
149,61	63,2328	86,0826	2	0,62	0,0006	0,3124	213,618	251,074
157,48	63,0777	86,0840	2	0,62	0,0006	0,3116	213,619	251,075

Nota. La tabla muestra los resultados de los parámetros calculados por el software en función de la longitud de las acometidas del anillo-1 del centro poblado. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Figura 23.

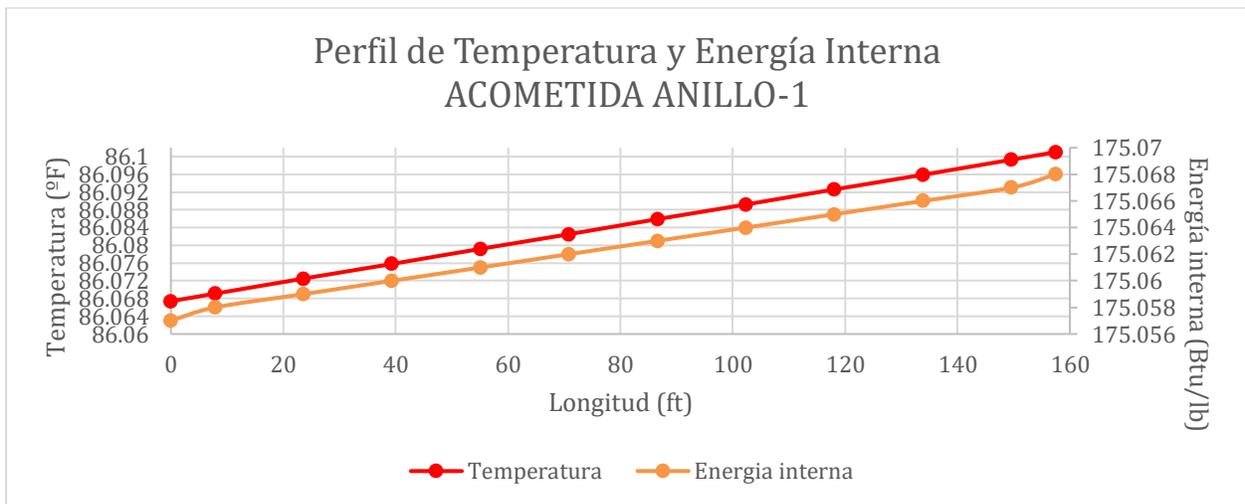
Perfil de Presión y Densidad Másica vs. Longitud de acometida anillo-1



Nota. La gráfica muestra el perfil de declinación de la presión y densidad másica en función de la longitud de las acometidas del anillo-1, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Figura 24.

Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud de acometida anillo-1



Nota. La gráfica muestra el perfil de ascensión de la temperatura y energía interna del GN en función de la longitud de las acometidas del anillo-1, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Tabla 24.

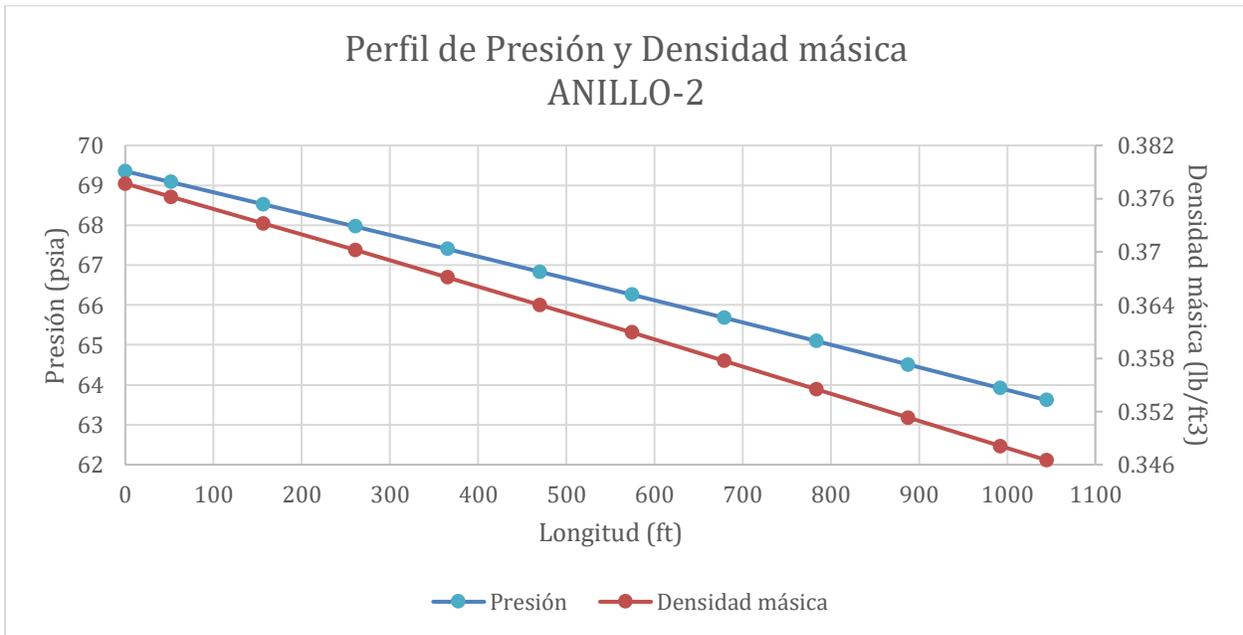
Profile View del anillo-2 del centro poblado

Axial Length [ft]	Pressure [psia]	Temperature [F]	Mass Flow [lb/hr]	Velocity [ft/s]	Mach Number	Mass Density [lb/ft ³]	Internal Energy [Btu/lb]	Enthalpy [Btu/lb]
0,00000	66,1143	86,0561	2	0,34	0,0003	0,3266	213,784	251,239
52,247	65,7479	86,0575	2	0,35	0,0003	0,3248	213,785	251,240
156,74	65,0110	86,0603	2	0,35	0,0003	0,3212	213,786	251,241
261,24	64,2655	86,0631	2	0,35	0,0003	0,3175	213,787	251,242
365,73	63,5113	86,0659	2	0,36	0,0003	0,3138	213,788	251,243
470,23	62,7479	86,0687	2	0,36	0,0003	0,3100	213,789	251,245
574,72	61,9751	86,0714	2	0,37	0,0003	0,3062	213,790	251,246
679,22	61,1924	86,0742	2	0,37	0,0004	0,3023	213,791	251,247
783,71	60,3996	86,0770	2	0,38	0,0004	0,2984	213,793	251,249
888,21	59,5961	86,0798	2	0,38	0,0004	0,2944	213,794	251,250
992,70	58,7816	86,0826	2	0,39	0,0004	0,2904	213,795	251,251
1044,9	58,3716	86,0840	2	0,39	0,0004	0,2884	213,795	251,252

Nota. La tabla muestra los resultados de los parámetros calculados por el software en función de la longitud del anillo-2 del centro poblado. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Figura 25.

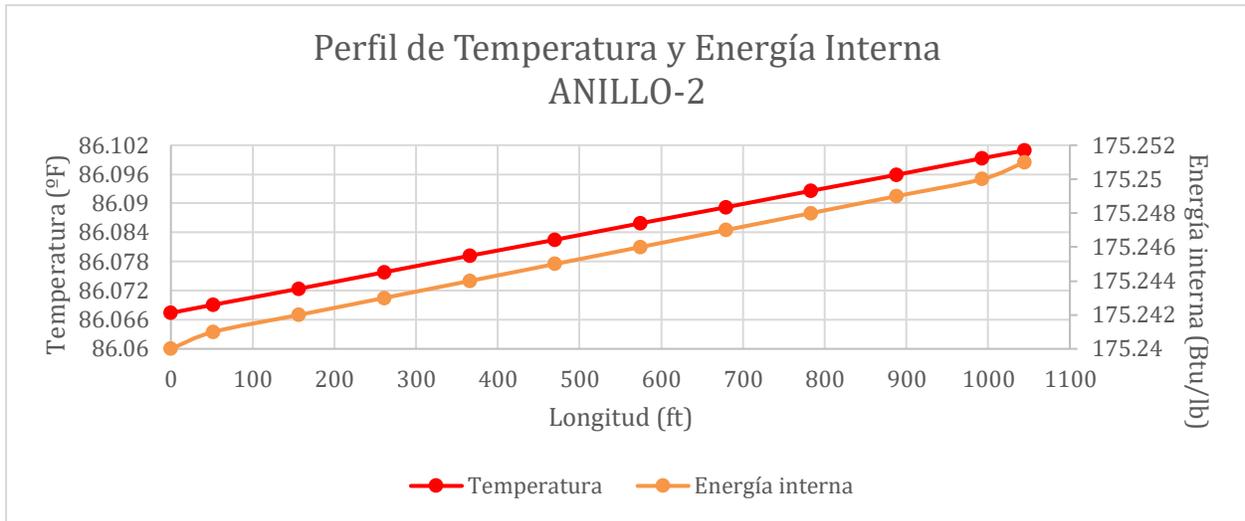
Perfil de Presión y Densidad Másica vs. Longitud de anillo-2



Nota. La gráfica muestra el perfil de declinación de la presión y densidad másica en función de la longitud del anillo-2, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Figura 26.

Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud de anillo-2



Nota. La gráfica muestra el perfil de ascensión de la temperatura y energía interna del GN en función de la longitud del anillo-2, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Finalmente se obtienen las condiciones de entrada a las últimas acometidas correspondientes al anillo-2 (Corriente 11), las cuales con un cambio de diámetro a 1/2” proveen de gas a las 29 viviendas restantes del centro poblado (Corriente 12).

Tabla 25.

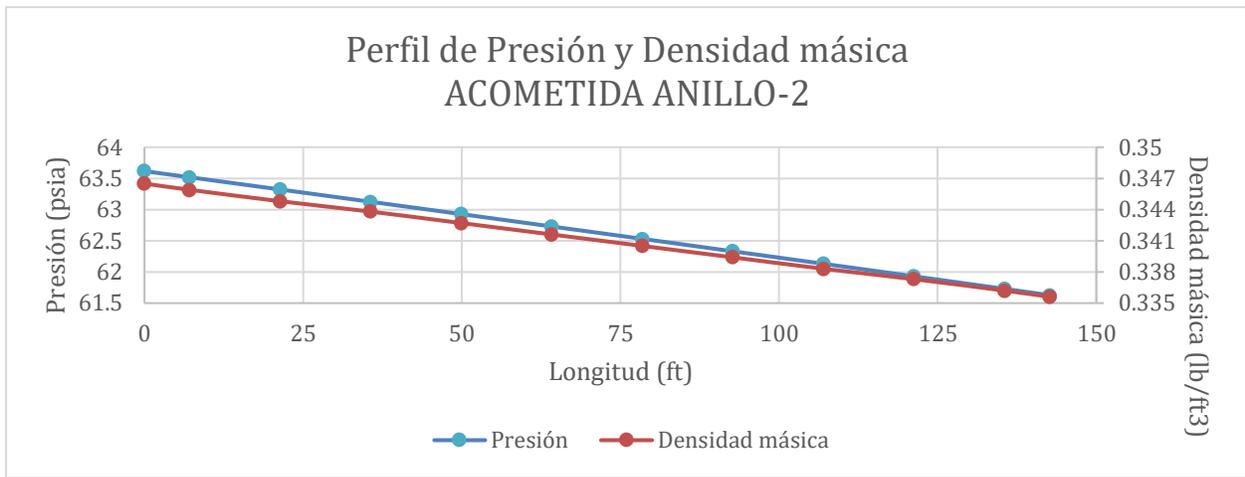
Profile View de las acometidas del anillo-2 del centro poblado

Axial Length [ft]	Pressure [psia]	Temperature [F]	Mass Flow [lb/hr]	Velocity [ft/s]	Mach Number	Mass Density [lb/ft ³]	Internal Energy [Btu/lb]	Enthalpy [Btu/lb]
0,00000	58,3716	86,0840	2	0,61	0,0006	0,2884	214,156	251,613
7,1358	58,2371	86,0854	2	0,61	0,0006	0,2877	214,157	251,613
21,407	57,9674	86,0882	2	0,61	0,0006	0,2864	214,158	251,614
35,679	57,6965	86,0910	2	0,61	0,0006	0,2850	214,159	251,616
49,951	57,4243	86,0938	2	0,62	0,0006	0,2837	214,160	251,617
64,222	57,1508	86,0966	2	0,62	0,0006	0,2823	214,161	251,618
78,494	56,8759	86,0993	2	0,62	0,0006	0,2810	214,162	251,620
92,766	56,5997	86,1021	2	0,63	0,0006	0,2796	214,163	251,621
107,04	56,3221	86,1049	2	0,63	0,0006	0,2782	214,164	251,622
121,31	56,0432	86,1077	2	0,63	0,0006	0,2769	214,165	251,623
135,58	55,7628	86,1105	2	0,64	0,0006	0,2755	214,166	251,625
142,72	55,6222	86,1119	2	0,64	0,0006	0,2748	214,167	251,625

Nota. La tabla muestra los resultados de los parámetros calculados por el software en función de la longitud de las acometidas del anillo-2 del centro poblado. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Figura 27.

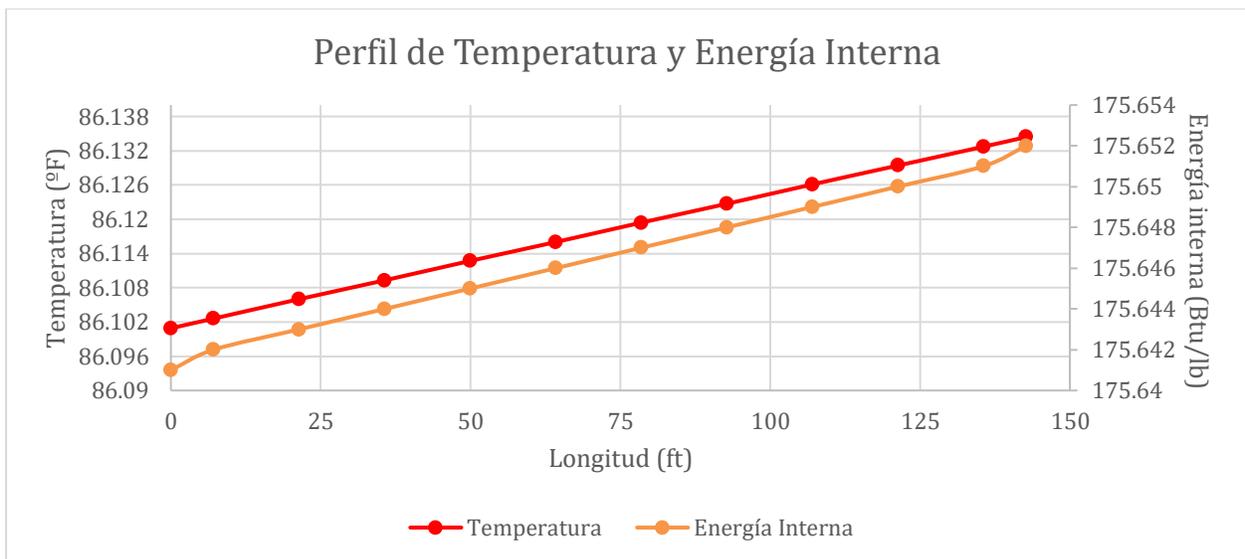
Perfil de Presión y Densidad Másica vs. Longitud de acometida anillo-2



Nota. La gráfica muestra el perfil de declinación de la presión y densidad másica en función de la longitud de las acometidas del anillo-2, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Figura 28.

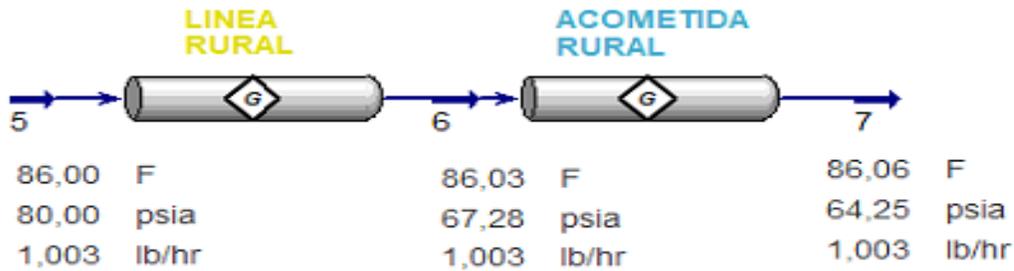
Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud de acometida anillo-2



Nota. La gráfica muestra el perfil de ascensión de la temperatura y energía interna del GN en función de la longitud de las acometidas del anillo-2, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015

Figura 29.

Diseño de la red de distribución de GN para la zona rural



Nota. La figura muestra el diseño de la red de distribución de GN para la zona rural de San Roque. Tomado de la simulación realizado en el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Tabla 26.

Resultados de las corrientes de materia en la red de la zona rural

Case - Material Stream			
Name	5	6	7
Pressure [psia]	80	67,2820	64,2489
Temperature [F]	86	86,028	86,055
Mass Flow [lb/hr]	1,003	1,003	1,003
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	0,166	0,166	0,166
Vapor / Phase Fraction	0,944	0,949	0,950

Nota. La tabla muestra los resultados de los parámetros de cada una de las corrientes de materia del diseño de la red de la zona rural de San Roque. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

En la tabla 26 se pueden observar las presiones de trabajo calculadas por el software para cada una de las corrientes del diseño, estas presiones de operación cumplen con los criterios generales de especificación para los sistemas de tuberías que se utilizan para el transporte, distribución y suministro consideradas en la NTC 3838, que es el mismo valor discutido en la sección del diseño de la zona urbana, por tanto, hasta el momento del análisis el diseño de la zona rural cumple con los requisitos establecidos.

Para este diseño se consideró también un sistema adiabático, pero como sucedió en el caso anterior, se observa que existe un cambio mínimo en la temperatura del fluido durante su transporte por la red. Como sucedió igualmente en el diseño de la zona poblada existe un cambio en la fracción de vapor del fluido, este incremento puede ser producidas por el cambio de diámetro durante el transporte del GN de la línea rural a las acometidas, mejorando el rendimiento del gas a la llegada a las edificaciones.

Tabla 27.

Resultados de los tramos de tubería de la red de la zona rural

Compressible Gas Pipe		
Name	LINEA RURAL	ACOMETIDA RURAL
Pressure Drop [psi]	12,72	3,033
Heat Transfer Coefficient [Btu/hr-ft ² -F]	0,000	0,000
Maximum Pressure [psia]	80,000	67,28
Maximum Velocity [ft/s]	0,1046	0,1707
Nominal Diameter [in]	1,000	0,750
External Diameter [in]	1,310	1,050
Internal Diameter [in]	1,212	0,971
Roughness [in]	0,00055	0,00055

Nota. La tabla muestra los resultados de algunos parámetros de cada tramo de tubería del diseño de la red de la zona rural de San Roque. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

En la tabla 27 se observa que existe una pérdida de carga en los dos tramos de la tubería, siendo mayor la pérdida en la línea rural, lo que es entendible por lo que se ha venido discutiendo durante el desarrollo del proyecto, que con mayores longitudes, mayores son las pérdidas de carga, sumado a esto, esta línea al ser tan extensa tiene altas variaciones en altura geométrica y pérdidas localizadas por el cambio de movimiento que experimenta el fluido cuando cambia de dirección al ser una zona muy montañosa, lo que se considera desfavorable del circuito.

La red de distribución para la zona rural inicia con la construcción de la línea secundaria de 3,000 metros de longitud denominada línea rural, que conduce el gas desde el City Gate por la vía pública hasta las acometidas de cada una de las viviendas, una vez se especifica este tramo y las condiciones de entrada, automáticamente se determinan las propiedades y condiciones del fluido

a la llegada a las acometidas (Corriente 6). Como se puede observar en la figura 29, el gas entra a la línea rural a una presión de 80 psia y sale a una presión de 67.28 psia, observando que la caída de presión en este tramo de tubería es de 12.72 psia, un valor más alto que en cualquiera de los tramos de tubería del centro poblado, pero esto es debido al fuerte impacto que tiene la longitud, por lo que la distancia es mucho mas extensa.

Tabla 28.

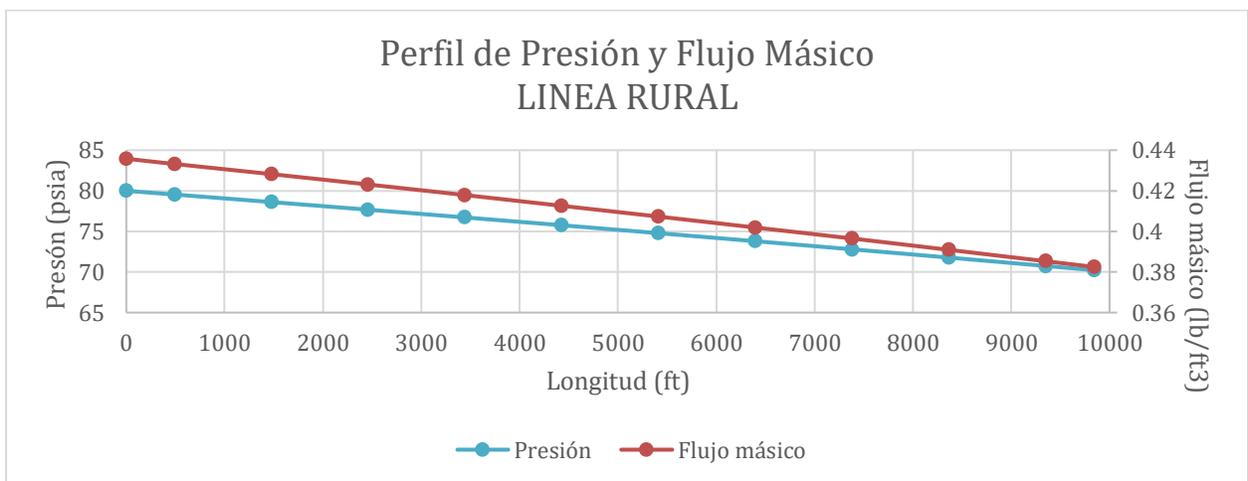
Profile View de la línea rural

Axial Length [ft]	Pressure [psia]	Temperature [F]	Mass Flow [lb/hr]	Velocity [ft/s]	Mach Number	Mass Density [lb/ft3]	Internal Energy [Btu/lb]	Enthalpy [Btu/lb]
0,00000	80,0000	86,0000	1	0,09	0,0001	0,3953	212,826	250,276
492,13	79,4105	86,0014	1	0,09	0,0001	0,3924	212,826	250,277
1476,4	78,2225	86,0042	1	0,09	0,0001	0,3865	212,827	250,278
2460,6	77,0161	86,0070	1	0,09	0,0001	0,3805	212,828	250,280
3444,9	75,7904	86,0098	1	0,09	0,0001	0,3745	212,829	250,281
4429,1	74,5444	86,0126	1	0,09	0,0001	0,3683	212,831	250,282
5413,4	73,2772	86,0154	1	0,10	0,0001	0,3621	212,832	250,283
6397,6	71,9875	86,0182	1	0,10	0,0001	0,3557	212,833	250,285
7381,9	70,6742	86,0210	1	0,10	0,0001	0,3492	212,834	250,286
8366,1	69,3359	86,0238	1	0,10	0,0001	0,3426	212,835	250,287
9350,4	67,9712	86,0266	1	0,10	0,0001	0,3358	212,836	250,289
9842,5	67,2820	86,0280	1	0,10	0,0001	0,3324	212,837	250,289

Nota. La tabla muestra los resultados de los parámetros calculados por el software en función de la longitud del tramo de la línea rural. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Figura 30.

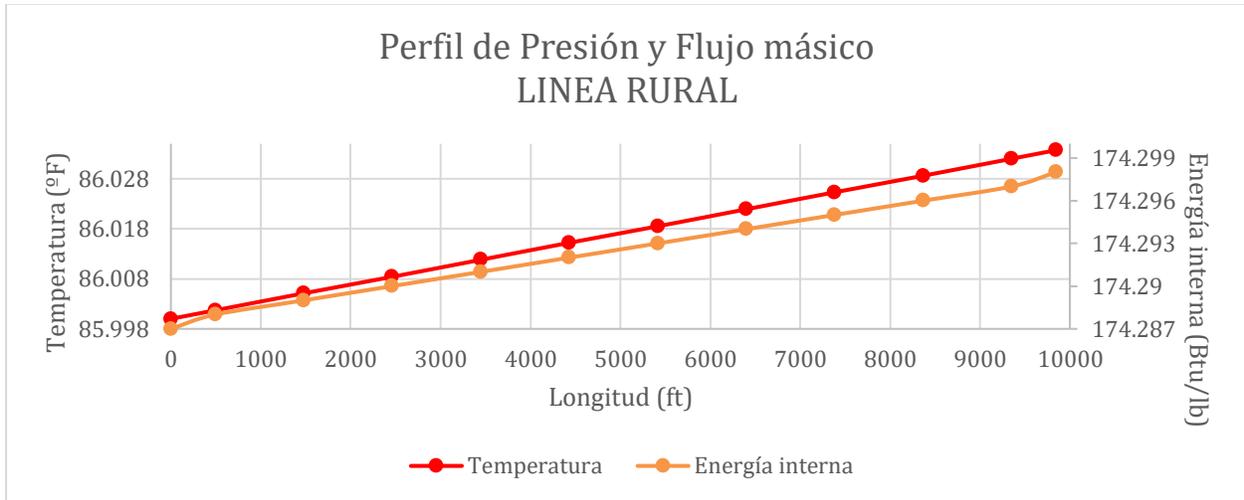
Perfil de Presión y Flujo Másico vs. Longitud de la línea rural



Nota. La figura muestra el perfil de declinación de la presión y flujo másico en función de la longitud del tramo de la línea rural, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015

Figura 31.

Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud de la línea rural



Nota. La figura muestra el perfil de ascensión de la temperatura y energía interna del GN en función de la longitud del tramo de la línea rural, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015

Por medio de una reducción de diámetro en donde la tubería pasa de ser de 1” a 3/4”, se determina finalmente las condiciones a la cual llega el GN a cada una de las acometidas (Corriente 7), que proveen de gas a las 14 fincas ubicadas vía campo Cerro Gordo.

Tabla 29.

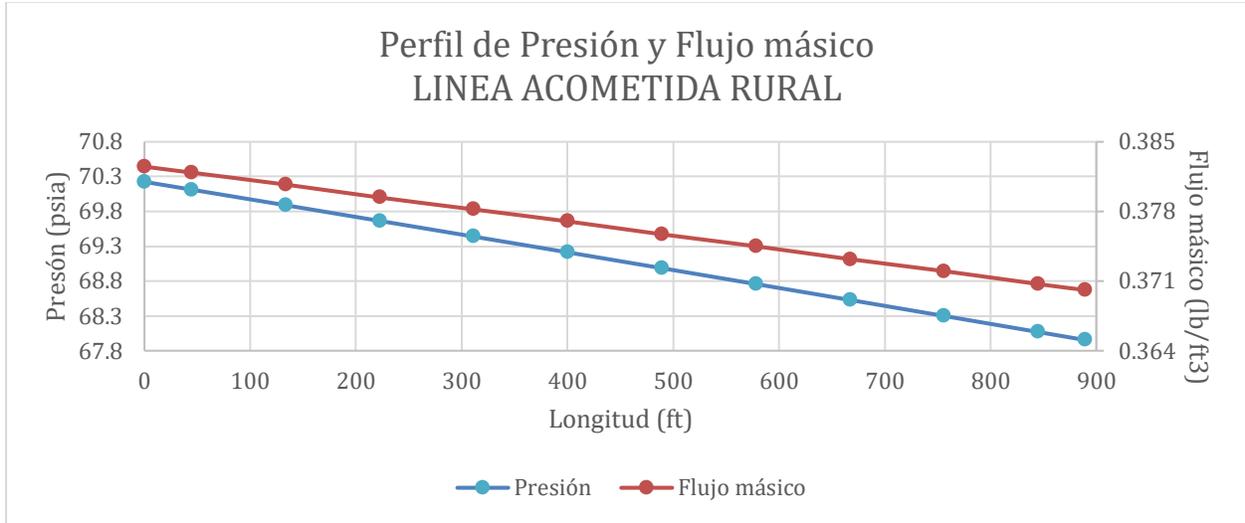
Profile View de la línea de acometida rural de San Roque

Axial Length [ft]	Pressure [psia]	Temperature [F]	Mass Flow [lb/hr]	Velocity [ft/s]	Mach Number	Mass Density [lb/ft3]	Internal Energy [Btu/lb]	Enthalpy [Btu/lb]
0,00000	67,2820	86,0280	1	0,16	0,0002	0,3324	213,504	250,957
44,472	67,1335	86,0294	1	0,16	0,0002	0,3317	213,505	250,958
133,42	66,8358	86,0322	1	0,16	0,0002	0,3302	213,506	250,959
222,36	66,5368	86,0350	1	0,16	0,0002	0,3287	213,507	250,960
311,30	66,2363	86,0378	1	0,17	0,0002	0,3273	213,508	250,962
400,25	65,9345	86,0406	1	0,17	0,0002	0,3258	213,509	250,963
489,19	65,6313	86,0434	1	0,17	0,0002	0,3243	213,510	250,964
578,13	65,3266	86,0462	1	0,17	0,0002	0,3228	213,512	250,965
667,08	65,0205	86,0490	1	0,17	0,0002	0,3212	213,513	250,967
756,02	64,7129	86,0518	1	0,17	0,0002	0,3197	213,514	250,968
844,96	64,4039	86,0546	1	0,17	0,0002	0,3182	213,515	250,969
889,44	64,2489	86,0560	1	0,17	0,0002	0,3174	213,515	250,970

Nota. La tabla muestra los resultados de los parámetros calculados por el software en función de la longitud del tramo de la línea de acometida rural. Tomada de información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015.

Figura 32.

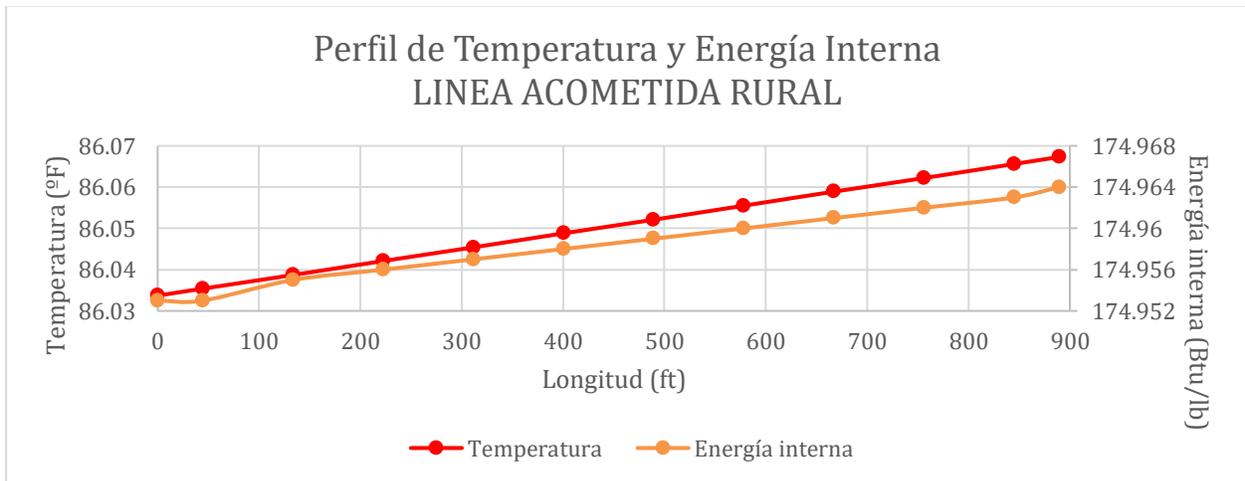
Perfil de Presión y Flujo Másico vs. Longitud de la línea acometida rural



Nota. La figura muestra el perfil de declinación de la presión y flujo másico en función de la longitud del tramo de la línea de acometida rural, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015

Figura 33.

Perfil de Temperatura y Energía Interna vs. Longitud de línea acometida rural



Nota. La figura muestra el perfil de ascensión de la temperatura y energía interna del GN en función de la longitud del tramo de la línea de acometida rural, datos que fueron calculados por el software. Realizada con la información proporcionada por el software Aspen Hysys V.10. Aspen Tech, 2015

La densidad de una sustancia varía con cambios de presión y temperatura, siendo mucho más notoria este cambio en los gases que en los líquidos y sólidos, al observar las gráficas de Presión y Densidad másica vs. Longitud para cada tramo de tubería del diseño de la red de la zona urbana, se observa que esta variable presenta un perfil de declinación a medida de que atraviesa de punto a punto cada tramo, este comportamiento se debe a los cambios de presión que se ven reflejados en toda la extensión de la tubería, ya que este factor es directamente proporcional con la densidad según los modelos matemáticos, por tanto, como se ha venido hablando se verifica que la presión efectivamente tiene también un comportamiento descendente a lo largo de la tubería.

Adicionalmente se observa en las gráficas de Temperatura y Energía interna vs. Longitud, a diferencia de las anteriores, que tienen un comportamiento de incremento a lo largo de la tubería, esto puede ser a causa del movimiento del fluido dentro de esta, que al estar las moléculas más separadas unas de otras y en constante flujo, chocan frecuentemente aumentando la energía cinética y con ello la energía interna del gas y su temperatura.

A partir de los datos obtenidos de Aspen Hysys se puede concluir que los diseños construidos de la red de distribución de GN son adecuados para San Roque, en vista de que los cambios de presión y temperatura que se presentan son bajos e idóneos con los diámetros seleccionados, sin superar el porcentaje máximo de las caídas de presión, el cual no debe superar el 15%, además se garantiza que el flujo de gas se mantenga en fase vapor hasta llegar a las líneas de acometida de cada edificación y que la presión de suministro a estas acometidas es mayor al valor de la caída de presión total a lo largo de la tubería y menor al valor máximo establecido en las NTC, a las velocidades y temperaturas operativas permitidas.

3.5 Análisis financiero de la propuesta

En este capítulo se presenta el análisis financiero realizado para determinar la factibilidad del proyecto, se presenta información como costos de inversión y operación y los resultados del cálculo de los indicadores económicos VPN y TIR para la toma de decisiones del proyecto.

3.5.1 Costos de inversión

Para el cálculo de los costos de inversión necesarios para el desarrollo de este proyecto, se estudiarán las inversiones del sistema de gasoducto virtual y las inversiones para la construcción del tendido de tubería rural y urbano.

3.5.1.a. Inversiones del gasoducto virtual: Como se ha venido hablando a lo largo del documento, el gasoducto virtual consiste en tres etapas que son observadas en la anterior imagen, sin embargo, en cuestiones de las inversiones se tendrán en cuenta la etapa del transporte y descompresión, en vista que la primera etapa, la compresión y carga de GNC, ya es realizada actualmente en la Planta la Florida y no habría la necesidad de incurrir en inversiones para la compra de equipos de interés en esta etapa.

Para la etapa del transporte del GNC se debe considerar dentro de las inversiones, el almacenamiento en el módulo a usar que consta de los cilindros, las tuberías de conexión para llenado y vaciado del módulo y el bastidor el cual es el que se ubica en el camión de transporte, el módulo tiene una vida útil de 20 años y en la cual se deberá recuperar su inversión, estas inversiones se ven reflejadas en la siguiente tabla.

Tabla 30.

Inversiones en almacenamiento y transporte del GNC

Inversiones	Cantidad	Precio Unitario (COP)	Precio Total (COP)
Cilindro de 25m ³	12	848,584	10,183,008
Válvulas y conexiones	12	57,443	689,322
Bastidor	1	4,786,958	4,786,958

Nota. La tabla muestra las inversiones para el transporte de GNC por gasoducto virtual. Comisión de la regulación de energía y gas. Documento CREG-048, Compresión y transporte de GNC, propuesta regulatoria para consulta, Bogotá.

Al arribar al centro de descompresión, el GNC es descargado para alimentar al equipo reductor de presión, inversión que se tiene que tener en cuenta para el desarrollo del proyecto, en la revisión bibliográfica encontramos una planta moduladora de regulación especialmente pensada para los sistemas de gasoducto virtual en donde los rangos de operación son muy amplios y se ajustan perfectamente a lo requerido, en vista que la red diseñada no está interconectada a los gasoductos convencionales de transporte de GN en la región de Norte de Santander, por lo tanto se requiere

de una unidad que proporciones almacenamiento, regulación, calentamiento, medición, filtración, odorización, toma de muestra y limpieza.

Tabla 31.

Inversiones en la descompresión del GNC

Inversiones	Modelo	Precio (COP)
Equipo Regulador e Instalación	PRP-5000	500,000,000

Nota. La tabla muestra las inversiones para el sistema de descompresión y odorización del GNC. Tomado de Julián Gregorio de las Hedas, Análisis comparativo de gasoductos virtuales frente a otras alternativas de abastecimiento energético, 2015.

3.5.1.b. Inversiones tendido de tubería. Para la construcción de tendido de tubería se deben tener en cuenta variables tales como materiales y valor de instalación, dichos costos son referenciados del catálogo de precios de PAVCO WAVIN del 2021, basados en el diseño del plano (Anexo 2), y en tablas expuestas anteriormente donde se define material de tubería, longitud y diámetro de la misma, finalmente tipo y cantidad de accesorios requeridos.

Tabla 32.

Costos materiales y accesorios

Tipo	Cantidad	Precio Unitario (COP)	Precio Total (COP)
Tubería troncal 1"	90.31 m	4,618	417,051.58
Tubería anillos de distribución ¾"	589.6 m	2,948	1,738,140.8
Tubería acometida ½"	119.5 m	2,256	269,592
Tubería rural 1"	3,000 m	4,618	13,814,000
Válvula de seccionamiento	2	47,987	95,974
Válvula de corte individual	75	8,568	642,600
Válvula de control	2	45,136	90,264
Codo 1"	17	20,452	347,684
Codo ¾"	14	12,113	169,582
Reductor de diámetro 1" – ¾"	1	29,346	29,346
Reductor de diámetro 1" – ½"	14	28,521	399,294
Reductor de diámetro ¾" – ½"	61	23,589	1,438,929

Nota. La tabla muestra los costos de los materiales y accesorios necesarios para instalación de tubería. Realizada con la información proporcionada en D. S. Albarracín B., M. C. Arango T. *Diseño del sistema virtual y la red de distribución de gas natural en el municipio de Bucarasica desde el campo Cerro Gordo*, tesis pregrado. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2019.

Tabla 33.*Mano de obra e instalación*

Concepto	Precio unitario x metro lineal (COP)	Precio Total (COP)
Unión termofusión	847,000	2,099,713
Oficial	6,400	15,865,600
Ayudantes (2)	9,000	22,311,000
Retroexcavadora	28,000	69,412,000
Vibro compactador	700,000	1,735,300
Equipo de termofusión	3,400	8,428,600
Disposición de residuos	1,500	3,718,500

Nota. La tabla muestra los costos requeridos para instalación de tubería y mano de obra. Tomado de D. S. Albarracín B., M. C. Arango T. *Diseño del sistema virtual y la red de distribución de gas natural en el municipio de Bucarasica desde el campo Cerro Gordo*, tesis pregrado. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2019.

El costo total del proyecto es de **657,682,457 COP** (seiscientos cincuenta y siete millones seiscientos ochenta y dos mil cuatrocientos cincuenta y siete pesos), dentro de este costo se incluye todo lo correspondiente a las inversiones del gasoducto que a la hora de hoy no se tienen y al tendido de la tubería que para la construcción es necesario la excavación, relleno y retiro de escombros durante el proceso.

3.5.2 Flujo de Caja

Para determinar el flujo de caja se toma como base el año actual, que cuenta con un consumo promedio anual de 1,215 m³ incluyendo el centro poblado (vereda San Roque) y la zona rural (fincas aledañas), conformado por un número total de 81 viviendas y calculando el aumento de número de viviendas anual en base a la tasa de crecimiento poblacional anual (1,9%), se obtiene un promedio de aumento en número de viviendas de 2,1 anual, lo cual se aproxima a 2.

Es decir que para el año actual se harán cálculos en base a 81 viviendas, para el año 2 se cuentan 83 viviendas, para el año 3 se cuentan 85 viviendas, para el año 4 se cuentan 87, y para el año 5 se trabajara con 90 viviendas; además, cabe aclarar que se debe tener en cuenta el estrato de las viviendas en la zona de trabajo, el cual corresponde a un valor de estrato 1.

Tabla 34.*Ingresos por venta según estrato de viviendas*

Estrato	Conexiones	COP \$/m ³	Valor mensual (COP)	Valor anual (COP)
1	81	1,037.87	1,261,012.05	15,132,144.6

Nota. La tabla muestra los ingresos por venta según el estrato de vivienda sobre el cual se va a trabajar. Elaboración basada en información de Gases del Oriente S.A. Tarifas del mercado. [En línea]. Disponible en: <https://www.gasesdeloriente.com.co/web/>

Tabla 35.*Ingresos por venta anuales*

Concepto	Estrato	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Mensual (COP)	1	1,261,012.05	1,292,148.15	1,323,284.25	1,354,420.35	1,401,124.5
Anual (COP)	1	15,132,144.6	15,505,777.8	15,879,411	16,253,044.2	16,813,494

Nota. La tabla muestra los ingresos por venta según el estrato de vivienda calculados para el año 1, 2, 3, 4 y 5.

Tabla 36.*Compra GNC a la Planta La Florida*

Concepto	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Consumo (m ³)	1,215	1,245	1,275	1,305	1,350
\$/MMBTU	15,665	15,665	15,665	15,665	15,665
MMBTU	42.61	43.66	44.71	45.77	47.34
Mensual (COP)	667,485.65	683,933.9	700,382.15	716,987.05	741,581.1
Anual (COP)	8,009,827.8	8,207,206.8	8,404,585.8	8,603,844.6	8,898,973.2

Nota. La tabla muestra los costos de compra del GNC. Elaboración basada con base en la información proporcionada por la empresa Wattle Petroleum Company.

Tabla 37.*Gastos en Transporte y Almacenamiento de GNC*

Concepto	Valor (COP)
Precio de la gasolina a hoy (\$/gal)	7,080
Consumo de combustible por el camión (gal/km)	0.3
Gasto Mensual con los 6 trayectos (COP)	165,672
Gasto en mantenimiento de cada módulo y camión	500,000
Gasto total mensual (COP)	665,672
Gasto Anual (COP)	7,988,064

Nota. La tabla muestra los costos de transporte del GNC. Elaborada con base en comisión de regulación de energía y gas (CREG) y análisis comparativo de gasoductos virtuales frente a otras alternativas de abastecimiento energético, Julián Gregorio de las Hedas.

Tabla 38.

Gastos en Descompresión del GNC

Concepto	Valor (COP)
Operación y Mantenimiento de la estación reguladora mensual (COP)	1,600,000
Operación y Mantenimiento de la estación reguladora Anual (COP)	19,200,000

Nota. La tabla muestra los costos de transporte del GNC. Elaborada con base en análisis comparativo de gasoductos virtuales frente a otras alternativas de abastecimiento energético, Julián Gregorio de las Hedas.

Tabla 39.

Gastos en transporte por tuberías del GN

Concepto	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
\$/m ³	1,346.17	1,346.17	1,346.17	1,346.17	1,346.17
m ³ /mes	101.25	103.75	106.25	108.75	112.5
Mensual (COP)	136,299.712	139,665.138	143,030.562	146,395.988	151,444.125
Anual (COP)	1,635,596.54	1,675,981.66	1,716,366.74	1,756,751.86	1,817,329.5

Nota. La tabla muestra los costos de transporte del GNC. Elaborada con base en comisión de regulación de energía y gas (CREG)

Tabla 40.

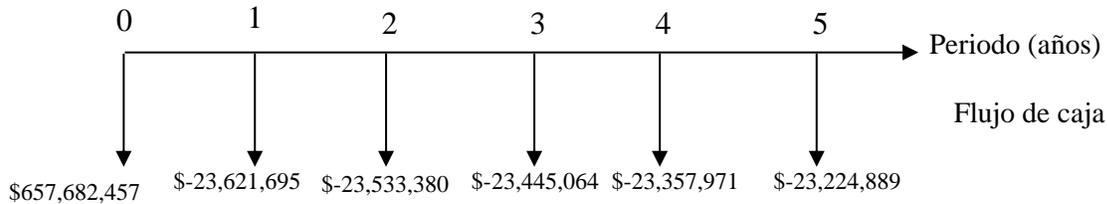
Flujo de caja (horizonte de proyección)

Concepto	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ventas GNC (+)	15,132,144.6	15,505,777.8	15,879,411	16,253,044.2	16,813,494
Costos GNC (-)	8,009,827.8	8,207,206.8	8,404,585.8	8,603,844.6	8,898,973.2
Transporte por tubería (-)	1,635,596.54	1,675,981.66	1,716,366.74	1,756,751.86	1,817,329.5
Transporte y almacenamiento (-)	7,988,064	7,988,064	7,988,064	7,988,064	7,988,064
Descompresión (-)	19,200,000	19,200,000	19,200,000	19,200,000	19,200,000
Utilidad Bruta	-21,701,343.26	-21,565,474.34	-21,429,604.46	-21,295,615.74	-21,090,872.3
Impuestos (-)	1,920,352.09	1,967,906.27	2,015,460.46	2,062,356.71	2,134,016.96
Utilidad neta	-23,621,695.17	-23,533,380.07	-23,445,064	-23,357,971.03	-
Flujo de caja Neto	-23,621,695.17	-23,533,380.07	-23,445,064	-23,357,971.03	23,224,889.34

Nota. La tabla muestra el horizonte de proyección (flujo de caja) para el desarrollo del proyecto.

Figura 34.

Flujo de caja



Nota. La figura muestra el flujo de caja a una proyección de 5 años.

Al realizar el cálculo de los flujos de caja respectivos para cada año se obtienen valores que oscilan entre $-\$23,621,695$ y $-\$23,224,889$, se presentan valores de flujo de caja negativos, debido en gran mayoría a que los costos de la descompresión del GNC se reflejan en valores altos ($19,200,000$), además, se observa que también influyen los altos costos de compra del GNC ($\$8,009,827 - \$8,898,973$ aproximadamente) información que fue suministrada por la empresa WATTLE PETROLEUM COMPANY S.A.S, es decir, que de acuerdo con los resultados obtenidos se observa que los flujos de caja se ven afectados en gran medida por el costo elevado de compra de GNC y el costo elevado de la descompresión del GNC requerido para cubrir la demanda del proyecto cuyo precio es de $15,665$ $\$/\text{MMBTU}$, representando un impacto en el aumento de los costos del proyecto, adicionalmente los ingresos que se presentan son bajos, debido al subsidio de ayuda que brinda el gobierno al precio de la tarifa por consumo de gas natural doméstico para viviendas de estrato 1, por consecuencia los costos del proyecto son altos en comparación con los ingresos que se pueden obtener basados en el cobro por consumo de la prestación del mismo. Se concluye entonces, que se debe evaluar un escenario nuevo del estudio financiero, incluyendo cambios en los parámetros más significativos e influyentes para determinar nuevas variables o variaciones en los resultados del mismo que brinden un escenario financiero positivo, se recomienda evaluar un horizonte de proyección mayor de 10 a 15 años para obtener el retorno del proyecto y encontrar el punto de equilibrio.

3.5.3 Indicadores VPN y TIR

Finalmente, se determina el valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR) mediante las ecuaciones 10 y 11, para obtener los siguientes valores: **VPN= -727,875,589.2** y **TIR= -1.4761**;

al evaluar el valor obtenido para el VPN se concluye que el proyecto no aporta riqueza por encima de la tasa mínima exigida, es decir, que el proyecto de inversión generara pérdidas, además, el valor negativo de la TIR indica que el proyecto debe rechazarse, por tanto, se concluye que la inversión no cumple con las expectativas de retorno operando con un capital de inversión alto que no genera remanentes, y que por consecuencia no se llegara a un punto de equilibrio pronto. Se recomienda evaluar un nuevo escenario del análisis financiero de la propuesta, con el fin de realizar cambios en parámetros que sean influyentes en la realización del mismo para determinar cambios en los resultados. Dentro de este nuevo análisis financiero se debe evaluar un horizonte de proyección a un mayor plazo (10 a 15 años) para estudiar el retorno de inversión del proyecto, así como incluir el porcentaje de subsidio que es cubierto por el Estado como concepto de los ingresos por cobro de las tarifas de consumo según el número de conexiones.

4 CONCLUSIONES

El gas que se obtiene en el Campo Cerro Gordo presenta un contenido alto de metano (72.69%), lo cual lo convierte en un gas apto para uso domiciliario, sin embargo, se deben tener en cuenta los elementos ácidos (10.37% CO₂), los cuales según el análisis realizado se encuentran en niveles altos para la distribución de este GN.

La producción que se presenta en el Campo Cerro Gordo de 1.1 MSCFD tiene la capacidad de abastecer anualmente la demanda de gas natural de 1,215 m³ requerida por la Vereda San Roque y zonas aledañas a esta.

La implementación del gasoducto virtual que recorre 13km desde la planta a San Roque cumple con las normativas del país y ofrece facilidad de acceso del GN a la población, lo que mejora la calidad de vida de los habitantes y satisface la demanda existente en la zona con un único módulo de capacidad de 300m³.

Con el sistema de descompresión propuesto en el software, se obtienen los parámetros de entrega de GN a la red troncal, observando una reducción de la presión a 80 psi y la temperatura a 86°F, valores que se encuentran dentro del rango permitido de entrega para el transporte de GN por tuberías en Colombia.

La red de distribución propuesta para el centro poblado esta conformada por una línea troncal de 90.31m con un diámetro nominal de 1", 589.6m de longitud total de los anillos de distribución con una longitud de ¾" y 91.5m de acometidas, las cuales se establece que tengan un diámetro de ½".

La red de distribución propuesta para la zona rural esta conformada por una línea rural de 3,000m con un diámetro de 1" y unas acometidas de ½" con una longitud total de 28m.

Se determinó que el material de las tuberías sean de PEMD debido a que la presión de suministro no excede los 100 psi, es altamente resistente a agentes agresivos externo y por su economía y facilidad de transporte.

La variación en la temperatura que se presenta en los resultados es debido al enterramiento de la tubería y a los cambios de sección de la tubería durante la conducción del gas, en vista que a menores secciones, más frecuentes son los choques entre las partículas del gas, aumentando su energía cinética y por ende una elevación leve de temperatura.

Las caídas de presión se debe a la fricción de las partículas del fluido con las paredes de la tubería y por accesorios que se encuentren durante la conducción, al haber longitudes y caudales mayores, y cambios de dirección y secciones de tubería. Sin embargo las caídas de presión presentadas no superan el porcentaje máximo establecido, siendo 9.0 psi la caída mas alta presentada en la red.

Los diseños construidos de la red de distribución de GN presentan valores aceptables, en vista de que los cambios de presión y temperatura que resultaron de la simulación, no superan los porcentajes máximos establecidos y cumplen con las variables de entrega del GN a las acometidas de cada vivienda.

El análisis financiero de la propuesta establece que el valor de la inversión inicial es de 657,682,457 COP para implementar la red de distribución de gas natural en la vereda San Roque y zonas aledañas.

Al realizar los cálculos para la pre-factibilidad del proyecto se encontró que el valor presente neto (VPN) es de -727,875,589.2 y la tasa interna de retorno (TIR) es de -1.4761, los valores negativos obtenidos de VPN y TIR indican que no se generan ingresos en el proyecto, por esto debe evaluarse otro escenario con respecto al análisis financiero.

RECOMENDACIONES

Realizar un estudio de mercadeo más detallado con los habitantes de la zona, en la que se implementen encuestas y se realice una observación directa para entender mejor el panorama social y comercial y asegurar el buen desempeño del proyecto.

Realizar la simulación de la red de distribución en el software AspenHysys con una actualización de la cromatografía del gas extraído, y si los niveles de CO₂ siguen altos, es necesario incluir un proceso de endulzamiento al gas en la planta, con el fin de ajustar el contenido de CO₂ a los valores permitidos.

Calcular si existen pérdidas de presión durante el transporte del GNC por el gasoducto virtual, para conocer con exactitud las condiciones de entrada a la red de distribución.

Llevar a cabo el trabajo de campo para verificar distancias y topografía en la zona, con el fin de corregir parámetros a la hora del trazado de la tubería.

Realizar las líneas internas de las viviendas para el suministro de GN, considerando las necesidades y equipos con los que disponen cada uno de los habitantes.

Evaluar el proyecto desde un punto de vista social que brinde una reducción en la inversión inicial y en los flujos de caja calculados, para poder brindar a la población de la vereda San Roque y zonas aledañas este sistema de distribución y a la compañía una alternativa con TIR en menor tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Unidad de Planeación Minero Energética. *Plan Indicativo de expansión de cobertura de gas combustible PIEC-GC*. Bogotá D.C. septiembre 2017. p 5.
- [2] D. S. Albarracín B., M. C. Arango T. *Diseño del sistema virtual y la red de distribución de gas natural en el municipio de Bucarasica desde el campo Cerro Gordo*, tesis pregrado. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2019. p.26
- [3] Agencia Nacional de Hidrocarburos. *Integración Geológica de la digitalización y Análisis de núcleos, cuenca Catatumbo*. Diciembre 2012. p. 48 - 146. [En línea].
Disponible en: <https://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/4.%20Informe%20Final%20Catatumbo.pdf>
- [4] WATTLE PETROLEUM COMPANY S.A.S. Operations. Bloque Carbonera [En línea].
Disponible en: <https://wattlepc.com/operaciones/>
- [5] Comisión de Regulación de Energía y Gas. *Nueva Propuesta de transporte de Gas Natural*. [En Línea]. [Consultado 20 de abril de 2021]. Disponible en: https://www.creg.gov.co/sites/default/files/nueva_propuesta_de_transporte_de_gas_natural.pdf
- [6] Comisión de Regulación de Energía y Gas. *Compresión y Transporte de Gas Natural Comprimido*. CREG-048. Agosto de 2004. p. 61- 63
- [7] Norma Técnica Colombiana NTC5897. Estaciones de carga y descarga de gas natural comprimido. Diciembre de 2011. p.1
- [8] Comisión de Regulación de Energía y Gas. *Especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema de transporte*. Documento CREG-017. Marzo de 2007. p.9.
- [9] Norma Técnica Colombiana NTC2505. *Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales y comerciales*. p. 1.

- [10] Norma Técnica Colombiana NTC4282. *Instalaciones para suministro de gas destinadas a usos industriales*. p. 1.
- [11] Norma Técnica Colombiana NTC3728. Gasoductos, líneas de transporte y redes de distribución de gas. p. 1.
- [12] Norma Técnica Colombiana NTC1746. Plásticos, tubos y accesorios termoplásticos para conducción de gases a presión. p. 1.
- [13] Norma Técnica Colombiana NTC3728. Gasoductos, líneas de transporte y redes de distribución de gas. Diciembre de 2011. p. 17.
- [14] Manual técnico, tubo sistemas de conducción de gas. CUESTA ERNESTO. Guía técnica para el diseño de una red de gas natural para uso industrial, aplicando la Norma Técnica Colombiana. p. 84.

ANEXO 1

Procedimiento para la construcción y simulación del sistema de descompresión en el software Aspen Hysys

ANEXO 2

Red de distribución de gas natural para la zona urbana y rural de San Roque

ANEXO 3

Procedimiento para la simulación en el software Aspen Hysys del tendido de tubería para la distribución de gas natural

ANEXO 4

Carta de aprobación del Director del Trabajo de Grado

ANEXO 5

Carta de aprobación Wattle Petroleum Company