

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño del sistema de transporte de CO<sub>2</sub> capturado en un sistema  
BECCS desde la provincia Pichincha hasta Shushufindi

### **PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

### **INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

Enrique José Dávila Vidal

Kevin Fernando Soledispa Chele

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

## Dedicatoria

---

El presente proyecto va dedicado a mis padres, hermanos, a mis abuelitas, que día a día pese a la distancia siempre me han llevado en sus oraciones. Se lo dedico a mi familia, que siempre me contagiaban de su alegría y energía para continuar en los buenos y malos momentos. A mi novia que estuvo desde mis inicios y hoy compartimos este logro juntos y amigos de toda la vida, con quienes compartí departamento y coincidimos en grandes anécdotas. A los profesores que forjaron mi carácter y a quienes de alguna u otra manera fueron parte de este logro.

*Enrique José Dávila Vidal*

## Dedicatoria

---

A mis hermanos y hermanas,

A mis sobrinos y sobrinas,

A mi pareja,

Y de manera especial a mi madre, Piedad Chele, quien desde que tengo memoria se ha encargado de darme todo lo que he necesitado, siendo un modelo a seguir para con mis futuras generaciones.

Y, por último, a mi padre, Federico Soledispa, quien desde el cielo seguramente se siente orgulloso de mi.

¡Los amo a todos!

***Kevin Fernando Soledispa Chele***

## Agradecimientos

---

Mi más sincero agradecimiento a Dios en primer lugar, por hacer posible este logro, porque me guía en cada paso que doy. A mis padres que son mi motor y mis fuerzas, hermanos, novia y familia en general, por su apoyo incondicional, porque jamás dudaron de mí, por estar presente en sus oraciones y por el amor que me brindan siempre. Un agradecimiento en especial a mis profesores de tesis, al Ing. Daniel Avilés, al Ing. Jorge Duque y al Ing. Ángel Ramírez quienes me guiaron y me apoyaron en este proyecto que me permitió llegar a una de mis más grandes metas.

*Enrique José Dávila Vidal*

## Agradecimientos

---

Agradezco a nuestro Padre Celestial por darme sabiduría y fe en los momentos cuando más lo necesitaba. A la ESPOL por formarme en sus aulas. A los docentes que, en su mayoría, desde el pre hasta el último semestre compartieron sus conocimientos con nosotros los estudiantes. A los ingenieros Daniel Avilés, Jorge Duque y Ángel Ramírez por guiarnos en la realización de este trabajo de titulación. Y finalmente me agradezco a mí mismo, por persistir hasta el final.

*Kevin Fernando Soledispa Chele*

## Declaración Expresa

---

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Enrique José Dávila Vidal, Kevin Fernando Soledispa Chele* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Enrique José Dávila  
Vidal



Kevin Fernando  
Soledispa Chele

## **Evaluadores**

---

**PhD. Ángel Ramírez**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**MSc. Daniel Avilés C**

PROFESOR TUTOR

## Resumen

El Dióxido de Carbono es el principal gas de efecto invernadero que acelera el avance del calentamiento global, y que se produce mayoritariamente a consecuencia de actividades humanas, por ejemplo, en plantas de generación de energía. Sin embargo, si este compuesto es transportado hacia un lugar seguro se contribuye con el cuidado del medio ambiente, por ello, se ha planteado como objetivo el diseño de un sistema de transporte que lleve el  $CO_2$  capturado en un sistema BECCS, desde Pichincha hasta Shushufindi; el cual se justifica en investigaciones realizadas en países desarrollados, donde se presenta como solución para gestión del  $CO_2$  producido durante la generación de energía. Para el desarrollo del proyecto se realizaron simulaciones en Aspen Plus donde se consideró tuberías aisladas de acero al carbono ASTM A106 que de acuerdo con una trayectoria específica, se encargaron de conducir el  $CO_2$  en estado supercrítico, impulsado por compresores ubicados en estaciones situadas en puntos estratégicos. Como resultado se obtuvo que fueron necesarios tres compresores para mantener el  $CO_2$  en estado supercrítico y que llegue a su destino; concluyendo que el uso de tuberías aisladas y el transporte en estado supercrítico fue la opción más conveniente para cumplir con los objetivos del proyecto.

Palabras Clave: Dióxido de carbono, Sistemas BECCS, Transporte por Tuberías, Compresores



### **Abstract**

Carbon Dioxide is the main greenhouse gas that accelerates the advance of global warming and is produced mainly as a result of human activities, for example, in power generation plants. However, if this compound is transported to a safe place, it contributes to caring for the environment, therefore, the design of a transport system that carries the  $CO_2$  captured in a BECCS system, from Pichincha to Shushufindi, has been proposed. ; which is justified in research carried out in developed countries, where it is presented as a solution for the management of  $CO_2$  produced during power generation. For the development of the project, simulations were carried out in Aspen Plus where it was considered, insulated carbon steel pipes ASTM A106 that, according to a specific trajectory, were in charge of driving the  $CO_2$  in a supercritical state, driven by compressors located in stations located at strategic points. As a result, it was obtained that three compressors were necessary to keep the  $CO_2$  in a supercritical state and that it reaches its destination; concluding that the use of insulated pipes and transport in a supercritical state was the most convenient option to meet the objectives of the project.

Keywords: Carbon dioxide, BECCS Systems, Pipeline Transport, Compressors

## Índice General

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Índice General.....	iii
Abreviaturas.....	vi
Simbología.....	vii
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tablas.....	ix
Índice de Planos.....	x
CAPÍTULO 1.....	1
1.1    Introducción.....	2
1.2    Descripción del problema.....	4
1.3    Justificación del Problema.....	5
1.4    Objetivos.....	6
1.4.1    Objetivo General.....	6
1.4.2    Objetivos Específicos.....	6
1.5    Marco Teórico.....	6
1.5.1    Dióxido de Carbono.....	6
1.5.2    Relación entre el cambio climático y el Dióxido de Carbono.....	7

1.5.3	Acciones reductoras del cambio climático producido por Dióxido de Carbono .....	8
1.5.4	Captura y Almacenamiento de Dióxido de Carbono .....	9
1.5.5	Sistemas BECCS .....	10
1.6	Fluidos Supercríticos .....	11
CAPÍTULO 2.....		12
2.1	Consideraciones geográficas del diseño .....	13
2.1.1	Lugar Geográfico de Captura del Dióxido de Carbono.....	16
2.1.2	Lugar Geográfico de Almacenamiento del Dióxido de Carbono .....	16
2.2	Alternativas propuestas.....	17
2.2.1	Transporte de Dióxido de Carbono mediante vía terrestre.....	17
2.2.2	Transporte de Dióxido de Carbono líquido a través de tuberías .....	17
2.2.3	Transporte de Dióxido de Carbono Supercrítico a través de Tuberías.....	18
2.3	Matriz de decisión.....	19
2.4	Selección de tubería .....	21
2.5	Simulación de Procesos .....	26
2.5.1	Modelo termodinámico para la simulación .....	26
2.5.2	Método Lee – Kesler – Plocker (LK PLOCK).....	27
2.6	Sistema de transporte de <b>CO<sub>2</sub></b> capturado.....	29
2.7	Diseño de estaciones de bombeo .....	30
2.7.1	Conjunto de válvulas .....	30

2.7.1.1 Válvula de compuerta .....	30
2.7.1.2 Válvula de Globo.....	30
2.7.2 Equipo motriz .....	31
2.7.3 Compresor .....	32
CAPÍTULO 3.....	33
3.1 Resultados y Análisis.....	34
3.1.1 Simulación del sistema de transporte .....	34
3.2 Planos de tubería.....	49
3.3 Estación de compresión .....	49
3.4 Análisis de costos.....	51
3.4.1 Costos iniciales.....	51
3.4.2 Costos Operativos.....	53
CAPÍTULO 4.....	57

**Abreviaturas**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage

**Simbología**

m	Metro
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
mm	Milímetro
in	Pulgada
PSI	Libra por pulgada cuadrada
Pa	Pascales
°F	Grados Fahrenheit
°C	Grados Celsius
q	Quintales
kW	kilovatio
kWh	kilovatio-hora
\$	Unidad monetaria expresada en dólares de los Estados Unidos de América

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Proceso Básico del Sistema BECCS .....	10
<b>Figura 2</b> Diagrama Presión - Temperatura para el <i>CO2</i> .....	11
<b>Figura 3</b> Red de Poliductos.....	14
<b>Figura 4</b> Trazado de polígono en AutoCAD.....	15
<b>Figura 5</b> Trazado de polígono en Google Earth.....	15
<b>Figura 6</b> Cisterna diseñada para el transporte de <i>CO2</i> por vía terrestre .....	17
<b>Figura 7</b> Transporte de <i>CO2</i> a través de tuberías.....	18
<b>Figura 8</b> Diagrama de flujo.....	25
<b>Figura 9</b> Diagrama para elección del método a usar en el Software Aspen Plus .....	28
<b>Figura 10</b> Diseño del sistema de transporte de <i>CO2</i> (Tuberías aisladas).....	35
<b>Figura 11</b> Esquemático del sistema de transporte.....	36
<b>Figura 12</b> Tramo del diseño de transporte .....	37
<b>Figura 13</b> Diseño del sistema de transporte de <i>CO2</i> (Tuberías sin aislante) .....	41
<b>Figura 14</b> Proyección de la sección lateral y frontal.....	49
<b>Figura 15</b> Aislamiento térmico de la tubería .....	49
<b>Figura 16</b> Estructura de la estación de compresión .....	50
<b>Figura 17</b> Medidas generales, en milímetros, de la estación de compresión.....	50

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Matriz de decisión.....	21
<b>Tabla 2</b> Características del Acero al Carbono ASTM A106.....	23
<b>Tabla 3</b> Componentes de sistema de transporte con tuberías aisladas.....	40
<b>Tabla 4</b> Componentes del sistema de transporte con tuberías sin aislante.....	44
<b>Tabla 5</b> Accesorios y longitudes de tuberías.....	46
<b>Tabla 6</b> Matriz de decisión para elegir el uso de aislante .....	47
<b>Tabla 7</b> Costos asociados al sistema de tubería .....	51
<b>Tabla 8</b> Costo de construcción de una estación de compresión.....	52
<b>Tabla 9</b> Costo de compresores .....	53
<b>Tabla 10</b> Sumatoria total de costos iniciales .....	53
<b>Tabla 11</b> Costos Operativos .....	54
<b>Tabla 12</b> Gastos por periodos.....	55
<b>Tabla 13</b> Costos de transporte del dióxido de carbono .....	56
<b>Tabla 14</b> División del poliducto Shushufindi – Quito en 278 subtramos .....	65



### Índice de Planos

<b>Plano 1</b> Medidas generales de una estación de compresión .....	76
<b>Plano 2</b> Estructura que sostiene la estación de compresión .....	77
<b>Plano 3</b> Esquemático del sistema de transporte .....	78

## **CAPÍTULO 1**

## 1.1 Introducción

El dióxido de carbono, por su fórmula química ( $CO_2$ ), es considerado uno de los principales gases que contaminan el medio ambiente, pues cuando se libera en grandes cantidades, hacia la atmosfera provoca de forma directa un aumento de temperaturas en la Tierra. Dentro de la tecnología se presentan diversas soluciones para evitar y mitigar de alguna u otra manera el impacto ambiental que provoca este compuesto. Este es el caso de la captura del  $CO_2$  emitido por las centrales eléctricas, plantas industriales, entre otras fuentes de emisión a gran escala.

El diseño del sistema de transporte de  $CO_2$  mediante la captura en un sistema BECCS (Bioenergía con Captura y Almacenamiento de Carbono) es un tema de interés y de gran relevancia en la actualidad dado que presenta múltiples desafíos en la urgencia de enfrentar y mitigar el cambio climático y la emisión de gases de efecto invernadero, de manera que la captura, el almacenamiento y transporte son soluciones claves para contrarrestar el impacto en el medio ambiente.

En el Ecuador, las consideraciones sobre tecnología BECCS suponen un verdadero desafío para los investigadores, inclusive el propio diseño del sistema de transporte de  $CO_2$  una vez que ya se encuentra capturado; sin embargo, partiendo de un estudio previo donde se consideró una planta de generación de energía a partir de biomasa, ubicada en la provincia de Pichincha, donde ya se ha implementado la tecnología BECCS en su etapa de captura de  $CO_2$ , se plantea diversas alternativas de solución para el de transporte del compuesto; considerando aspectos mecánicos, económicos y ambientales relacionados directamente con este proceso. Es decir, para realizar este diseño se requiere un análisis detallado y un enfoque personalizado de

manera que se adapten a las características y particularidades de la región que une la provincia de Pichincha y el cantón Shushuindi.

La problemática principal que se aborda en el presente estudio es la manera en cómo diseñar de forma segura y eficiente el sistema de transporte del  $CO_2$ , de la mano con desafíos tales como la infraestructura, la distancia que existe entre las ubicaciones, las propiedades y características del compuesto a transportar, y las regulaciones basadas en normas respecto a temas ambientales y de seguridad. El enfoque adoptado para resolver este problema implica un análisis integral que considera factores técnicos, económicos y ambientales, con el objetivo de encontrar la solución más viable y sostenible.

El presente estudio tiene como objetivo principal diseñar el sistema requerido para transportar el  $CO_2$  capturado en un sistema BECCS desde la provincia de Pichincha hasta Shushufindi. Para poder cumplir de manera óptima con el objetivo planteado se realiza una revisión de la literatura existente para resaltar y constatar las investigaciones previas de mayor interés y relevancia en el campo. En adición, se analizarán los factores, condiciones, características y requisitos específicos necesarios para el correcto funcionamiento del diseño. A partir de esta investigación exhaustiva se garantizará la eficiencia, la seguridad y la minimización del impacto ambiental.

En este documento se abordarán diferentes aspectos relacionados con el diseño del sistema de transporte de  $CO_2$  capturado, se discutirán las tecnologías de captura de  $CO_2$  más relevantes y las opciones de almacenamiento disponibles, evaluando sus ventajas y desventajas en el contexto específico de la provincia de Pichincha. De igual manera, se analizarán los métodos de transporte existentes, considerando aspectos técnicos como la presión y temperatura

del  $CO_2$ , diseño e instalación de estaciones de bombeo, la elección de los medios de transporte más adecuados y los requisitos de seguridad asociados.

Finalmente, se llevará a cabo un análisis económico para evaluar los costos y beneficios del sistema de transporte propuesto, considerando los aspectos financieros relacionados con la construcción de infraestructuras, el mantenimiento, el transporte y la tasa fija de descuento para la región.

## **1.2 Descripción del problema**

La variación de las temperaturas y los patrones climáticos que se muestran con mayor frecuencia son consecuencias de las emisiones de gases de efecto invernadero, consideradas las principales causas del calentamiento global. Estos cambios climáticos, que incluyen eventos extremos como sequías, inundaciones y tormentas más intensas, tienen impactos negativos en los ecosistemas, la biodiversidad, la agricultura, la salud humana y la infraestructura, pero es importante comprender el contexto más amplio y las razones subyacentes que justifican la necesidad de abordar este problema.

El diseño del sistema de transporte de  $CO_2$  es una parte clave de la problemática y solución, ya que debe garantizar un transporte seguro y eficiente del  $CO_2$  desde la provincia Pichincha hasta Shushufindi. Esto incluye la consideración de factores como la selección del transporte, selección del equipo necesario para el funcionamiento correcto, definición de la trayectoria idónea para el transporte del  $CO_2$ , selección del material, las propiedades y características que cumple el  $CO_2$ , factores como la presión, temperatura y corrosividad para el transporte del mismo; así como también se presentan las restricciones tales como el uso de las normativas específicas para cada uno de los componentes del diseño relacionadas con el transporte de sustancias no peligrosas pero que incluyen prevenciones para la protección del

medio ambiente. Se deben establecer reglas de seguridad para prevenir fugas y garantizar la protección de la comunidad y el entorno, el uso necesario de estaciones de bombeo para un control y abastecimiento mecánico de los diferentes puntos pre seleccionados dentro del diseño, dado que el transporte de  $CO_2$  requiere cumplir con altos estándares de seguridad y monitoreo para prevenir fugas y garantizar que el  $CO_2$  se mantenga confinado durante todo el proceso, reglas de seguridad e interacción con la comunidad y el medio ambiente.

### **1.3 Justificación del Problema**

La ejecución del presente estudio se presenta debido a la importancia sobre la óptima gestión del  $CO_2$  que resulta de la combustión que se lleva cabo en una planta de generación de energía, puesto que, si se trata de manera irresponsable, y este compuesto se libera al medio ambiente, se convierte en el principal gas de efecto invernadero que contribuye al deterioro de la capa de ozono y a la aceleración del calentamiento global; por lo tanto es necesario almacenar este compuesto para su posterior reutilización de una manera que afecte de manera mínima la sostenibilidad del medio ambiente.

El desarrollo de sistemas de captura y almacenamiento de  $CO_2$  (BECCS) se ha mostrado prometedor como solución a este problema. Estos sistemas implican capturar el  $CO_2$  antes de que se libere a la atmósfera, y enfocarnos netamente en el transportarlo a un lugar de almacenamiento seguro y luego usarlo o almacenarlo permanentemente. Sin embargo, la implementación del diseño de transporte del  $CO_2$  bajo el sistema BECCS presentó importantes desafíos de diseño y gestión.

A pesar de los desafíos, cada vez se implementan más proyectos para mitigar los efectos del calentamiento global y gestionar los gases contaminantes, incluido el  $CO_2$ . Estos proyectos muestran un interés creciente por encontrar soluciones que promuevan la sostenibilidad

ambiental. Representan un gran desafío, las ambiciones sobre nuevos proyectos que ayuden a mitigar los efectos del calentamiento global, que permitan tratar gases contaminantes de manera adecuada, va en aumento. Además, para contribuir con la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, la presente investigación se encamina a contribuir con los siguientes objetivos: Energía asequible y no contaminante; Industria, innovación e Infraestructura; Ciudades y comunidades sostenibles, Producción y consumo responsable y Acción por el clima.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo General***

Diseñar un sistema de transporte que lleve el  $CO_2$  capturado en un sistema BECCS, desde Pichincha hasta Shushufindi.

### ***1.4.2 Objetivos Específicos***

1. Encontrar las condiciones de operación adecuadas para el transporte del  $CO_2$ .
2. Encontrar el número de estaciones de bombeo requeridas para el transporte del  $CO_2$ .
3. Diseñar una estación de bombeo general siguiendo normativas existentes.
4. Realizar un esquema general de la trayectoria que seguirá la tubería de transporte y los planos de construcción de la estación de bombeo.
5. Realizar un análisis económico de los costos generales involucrados en el proyecto.

## **1.5 Marco Teórico**

### ***1.5.1 Dióxido de Carbono***

Tomando en consideración lo que aducen Tipler & Mosca (2010) el Dióxido de Carbono es un compuesto formado por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno, por lo tanto, su

formular molecular es  $CO_2$ , generalmente se lo encuentra en estado gaseoso, y aunque es un gas fundamental para el proceso de la fotosíntesis, presenta una baja concentración, de manera natural, en la atmosfera terrestre.

De manera similar Chang y Goldsby (2017) mencionan que el  $CO_2$  es un subproducto de la respiración celular en los organismos vivos, por lo tanto, se considera un compuesto esencial que actúa durante la transferencia de carbono entre el medio ambiente y los seres vivos. En adición, se conoce que el  $CO_2$  en esencia no es toxico, de hecho, es importante para la vida en la tierra, puesto que las plantas lo necesitan para realizar el proceso de fotosíntesis; el problema se da cuando las concentraciones de este gas se disparan en la atmosfera, provocando problemas ambientales (Mejía, 2022).

Existen algunas acciones que provocan el aumento de la concentración de  $CO_2$  en la atmosfera terrestre, entre ellas están la producción de este compuesto durante el proceso de combustión de biomasa, combustibles fósiles, y demás procesos provocados por la actividad humana; por tanto, se considera al  $CO_2$  como el principal gas de efecto invernadero responsable del calentamiento global (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022).

### ***1.5.2 Relación entre el cambio climático y el Dióxido de Carbono***

El cambio climático tiene su origen en el calentamiento global, que a su vez se origina por la enorme emisión de gases de efecto invernadero, entre ellos el  $CO_2$ , y que provoca estragos con serias consecuencias como olas de calor, derretimiento de glaciares, aumento del nivel de mar, inundaciones, sequias y demás; la emisión de estos gases, en parte se produce naturalmente, pero se ha visto multiplicada a lo largo de los años por el desarrollo industrial, y la actividad humana que provoca un gran impacto ambiental y provoca un riesgo para todo el planeta (Meddveczky y Ochoa, 2012).



Se conoce que desde tiempos muy remotos la variación de temperatura del clima se ha visto influenciada por los gases de efecto invernadero, principalmente con el  $CO_2$ ; de hecho, en la época presente, cuando los niveles de  $CO_2$  en la atmosfera suben, provoca el aumento de radiación infrarroja cercana a la superficie terrestre, lo cual desemboca en el incremento de la temperatura a nivel global (Molina, 2018).

### ***1.5.3 Acciones reductoras del cambio climático producido por Dióxido de Carbono***

Tomando en consideración que la problemática del calentamiento global es un tema preocupante para el planeta, en la actualidad se desea disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, entre ellos el  $CO_2$ , comenzando por hábitos personales sencillos como ahorrar energía en casa, de ser posible tratar de movilizarse a pie, en bicicleta o usando el transporte público, consumir menos energía, incentivar el hábito del reciclaje, y demás acciones que disminuyen la generación de  $CO_2$  por persona, que presenta niveles medios de 17,6 toneladas por año para una persona promedio en Estados Unidos, y 7.9 toneladas anuales por persona en el Reino Unido, sin embargo se recomienda que para mitigar el calentamiento global, la media por persona debería disminuir alrededor de 2,5 toneladas por año (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2017).

A nivel industrial también se realizan acciones para mitigar las emisiones de  $CO_2$ , y aunque reciclar este compuesto es mucho más complejo que las acciones antes mencionadas, la amenaza del cambio climático es tan seria, que cualquier iniciativa destinada a disminuir la emisión de este gas a la atmosfera es bienvenida, y deben incluir tecnologías conocidas como “carbón negativo”, que se refiere a la absorción del  $CO_2$  de la atmosfera, o el provocado por algún proceso, para después realizar algo productivo con él; de aquí surge la idea de capturar el  $CO_2$  producido por plantas eléctricas que usan carbón, petróleo o biomasa como combustible,

para después almacenarlo bajo tierra, evitando que no aumente la concentración de este gas en la atmosfera. Se sabe que existen proyectos piloto en ejecución usando esta tecnología, sin embargo, algunos se abandonan por los grandes costes que se ven involucrados en este proceso (National Geographic, 2012)

#### ***1.5.4 Captura y Almacenamiento de Dióxido de Carbono***

Tal y como su nombre lo indica, este proceso hace referencia a la captura de  $CO_2$  en las grandes centrales que realizan la quema de carbón o biomasa como combustible, y su posterior almacenamiento en lugares destinados para este propósito.

Según lo que indica Green Facts (2022), la captura y almacenamiento de  $CO_2$  es una técnica que puede usarse para disminuir las concentraciones de  $CO_2$  en la atmosfera, que es provocada por acciones humanas; dicha técnica se puede aplicar en las grandes centrales eléctricas y de manera general consiste en tres etapas principales: primero se captura el  $CO_2$  desde su fuente realizando la separación de otros gases que se generan en la combustión, después viene la etapa de transporte, donde el  $CO_2$  se conduce hasta un lugar de almacenamiento apropiado, finalmente este compuesto se almacena por un largo periodo de tiempo, dentro de grandes formaciones geológicas subterráneas, o en las profundidades del océano, manteniéndolo así fuera de la atmosfera del planeta.

De manera similar Gayán y Pérez-Vega (2019) indican que la captura y almacenamiento de  $CO_2$  hace referencia al conjunto de tecnologías usadas para separar y almacenar este compuesto que resulta de procesos industriales o de generación eléctrica, para luego transportarlo hasta un lugar adecuado para su almacenamiento permanente; esto se lo realiza con la finalidad de aislar el  $CO_2$  del ambiente, y evitar el aumento de concentración de este gas en la atmosfera terrestre.

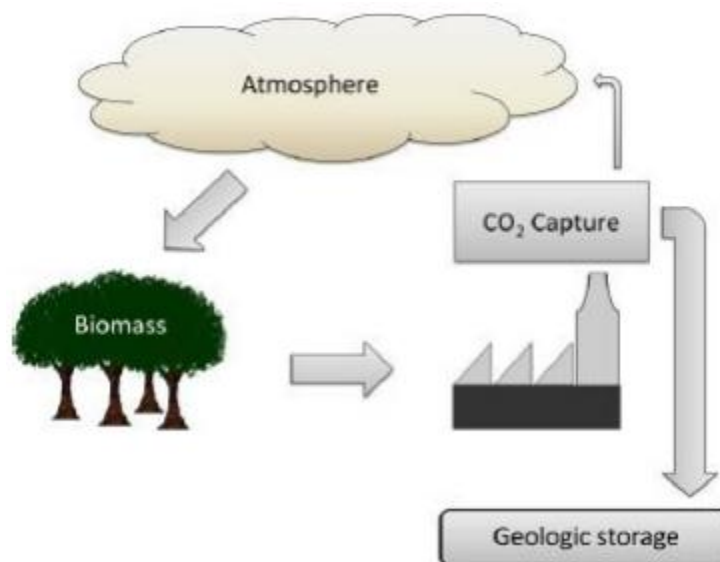
Uno de los lugares adecuados para el almacenamiento de  $CO_2$  son bajo los campos petroleros, de hecho, esto representaría un beneficio para esta industria, puesto que la inyección de este gas incrementa la eficiencia de los campos petroleros después del proceso de recuperación primaria, actuando como mecanismo de recuperación optimizado (Ansarizadeh et al., 2015).

### 1.5.5 Sistemas BECCS

Los sistemas BECCS, por sus siglas en inglés (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) es una proceso emergente donde se combinan las aplicaciones de energía de biomasa, generalmente en las plantas de generación de electricidad, con la captura y almacenamiento de  $CO_2$ ; de manera general, como se indica en la Figura 1, se trata de la absorción de este compuesto desde la atmosfera durante el crecimiento de la biomasa, para después, durante la combustión de esta materia prima, capturar el producido y almacenarlo de manera indefinida (Candel, 2019).

**Figura 1**

*Proceso Básico del Sistema BECCS*



Fuente: BBC New Services (2014)

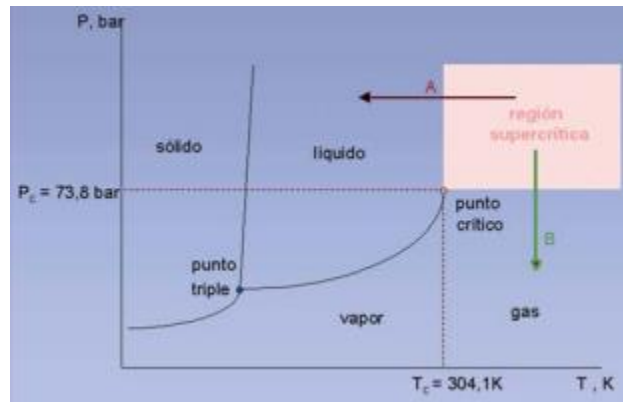
## 1.6 Fluidos Supercríticos

Se considera que un fluido se encuentra en fase supercrítica, cuando supera los valores de presión y temperatura determinados para el punto crítico. Cuando esto sucede, a temperaturas por encima de la crítica, no es posible llegar a la fase líquida por elevación de presión, pero si se puede de manera directa a líquido, esto si se reduce la temperatura a condiciones de presión constante; de manera similar, se puede llegar a una fase gaseosa si se disminuye la presión a temperatura constante.

En la Figura 2 se observa el diagrama presión – temperatura para el  $CO_2$ , se puede observar que el punto crítico corresponde a una temperatura  $T_c = 304.1 K$ ; y una presión de  $P_c = 73.8 bar$ .

**Figura 2**

*Diagrama Presión - Temperatura para el  $CO_2$*



Fuente: Sotelo y Ovejero (2003)

Con respecto a las propiedades de los fluidos supercríticos se puede mencionar que las densidades son más próximas a la del fluido en estado líquido, lo cual repercute en su solubilidad; por otro lado, las viscosidades de fluidos supercríticos se asemejan a la de los gases, lo cual facilita su movilidad y transporte.

## **CAPÍTULO 2**

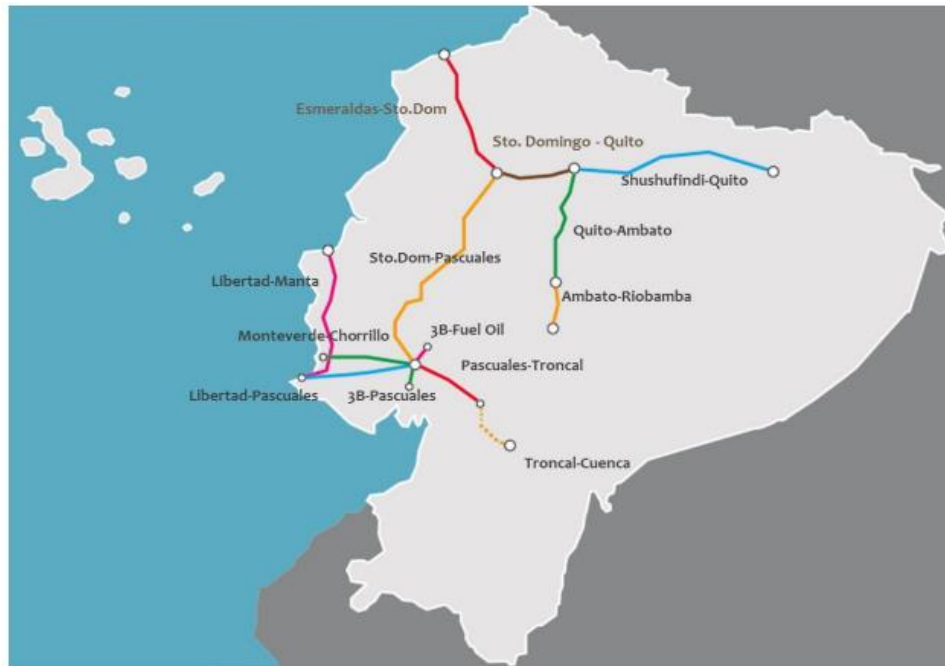
Para realizar este capítulo se tomó en consideración todas aquellas características necesarias para el diseño de un sistema de transporte de  $CO_2$  capturado, dichas consideraciones son: la distancia promedio que existe entre el punto de captura del fluido y el punto de almacenamiento, la diferencia de altura entre estos puntos, los medios de transporte por los cuales se puede mover el fluido, el estado y las características de este, entre otros aspectos. Esto se realizó con la finalidad de encontrar varias alternativas de solución, que posteriormente fueron evaluadas de acuerdo con su importancia, y mediante una matriz de decisión se pudo seleccionar la propuesta más idónea para realizar el estudio, posteriormente se detalló dicha propuesta, considerando todos los aspectos antes mencionados, además de normativa que rigen el diseño del tipo de sistemas que se escogió.

## **2.1 Consideraciones geográficas del diseño**

La naturaleza del diseño que se ha realizado en esta investigación tuvo la necesidad de considerar puntos geográficos del Ecuador, de manera especial, la provincia de Pichincha, donde se realiza la captura del  $CO_2$ , y el cantón Shushufindi, lugar donde se almacenara el fluido. Para ello consideramos un recurso investigativo por parte de la empresa EP Petroecuador entidad pública encargada de diferentes proyectos con relación al transporte de GLP mediante poliductos. Se consideró un diagrama de la red de poliductos en Ecuador, que se muestra en la Figura 3, donde se evidenció la presencia de una red que une a las ciudades en estudio, como lo es Quito y Shushufindi.

### Figura 3

#### *Red de Poliductos*

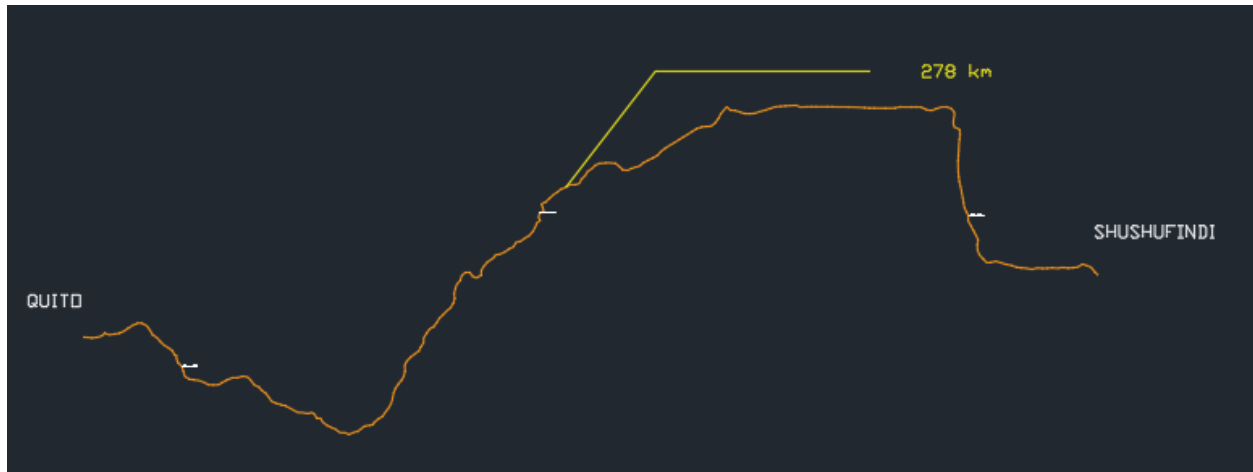


Fuente: (EP Petroecuador, 2017)

A partir de esta información se procede a considerar las coordenadas que siguen la trayectoria de nuestro caso de estudio, donde en base a esto se consideró una línea o red paralela para el transporte del  $CO_2$ . Además de las coordenadas, se consideró datos adicionales importantes para nuestro diseño como la altitud y distancia entre tramos. Con ayuda de AutoCAD se trazaron las coordenadas previamente transformadas al formato WGS84, obteniendo como resultado el polígono en cuestión, tal y como se observa en la Figura 4.

**Figura 4**

*Trazado de polígono en AutoCAD*



Una vez identificada la distancia total bajo las coordenadas específicas, se procede a llevar el modelo con formato DWG a KMZ mediante el uso del software Global Mapper y Google Earth, el cual, como se muestra en la Figura 5, nos permitió visualizar dicho trazado y conocer la topografía del terreno en 3D.

**Figura 5**

*Trazado de polígono en Google Earth*





Mediante el trazado en Google Earth, se pudo conocer de cerca como se visualiza la topografía del terreno y que consideraciones se deberían tomar para que el diseño sea mucho más eficiente y económico.

### ***2.1.1 Lugar Geográfico de Captura del Dióxido de Carbono***

Como se ha mencionó previamente, la provincia de Pichincha es el punto donde se realiza la captura del  $CO_2$ , de manera más específica en la cercanía de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, los mismos que se encuentran en las afueras de la ciudad de Quito. Se escogió esta área, porque es aquí donde se encuentra la planta generadora de energía que utiliza como combustible la biomasa procedente de los árboles de eucalipto, los mismos que abundan en esta zona, y que resultaron ser los más propicios para usarlos como combustible.

### ***2.1.2 Lugar Geográfico de Almacenamiento del Dióxido de Carbono***

Para escoger el lugar destinado para el almacenamiento del  $CO_2$ , se tomó en consideración los proyectos que se están realizando alrededor del mundo y que en su gran mayoría mencionaron alternativas para almacenar este fluido: formaciones geológicas bajo la superficie marina, o bajo la superficie terrestre. En otras palabras, el  $CO_2$  se almacenó bajo la corteza terrestre. De manera general se pudo notar que dichas formaciones geológicas se encuentran llenas de petróleo, por lo tanto, en la superficie de la tierra se encuentran los pozos petroleros; debido a la presión ejercida por el fluido sobre el petróleo, haciéndolo que su volumen aumente y su densidad disminuya, haciendo más sencillo su extracción del suelo.

El cantón Shushufindi se encuentra en la región oriente del Ecuador, zona petrolera donde se encuentran varias empresas dedicadas a la extracción de crudo, el mismo que se vuelve a usar para producir combustible, o se exporta al exterior.

## 2.2 Alternativas propuestas

Hoy en día existen varias formas de transportar un fluido desde un punto a otro. A continuación se proponen tres alternativas para dar solución al problema de transportar el  $CO_2$  desde el lugar de captura, hasta el lugar de almacenamiento.

### 2.2.1 Transporte de Dióxido de Carbono mediante vía terrestre

Para llegar por vía terrestre desde la provincia de Pichincha hasta el cantón Shushufindi se debe tomar la carretera transversal norte (E20) hasta el cantón Baeza, donde se debe tomar la carretera troncal amazónica (E45), ya sea en dirección norte o sur, hasta el punto conocido como “proyecto” donde se toma una carretera secundaria para llegar hasta los pozos petroleros, por ende, el transporte vía terrestre, usando tanqueros que lleven el fluido, se considera una alternativa válida, tal como se muestra en la Figura 6.

**Figura 6**

*Cisterna diseñada para el transporte de  $CO_2$  por vía terrestre*



Fuente: CIR Industria Metalúrgica (2017)

### 2.2.2 Transporte de Dióxido de Carbono líquido a través de tuberías

Otra de las alternativas propuesta tomó en consideración usar un sistema de tuberías, para a través de ellas, transportar el  $CO_2$  desde su captura hasta su almacenamiento. Esta idea se basó

en el uso común de este tipo de sistemas para transportar fluidos desde un punto a otro que se encuentran físicamente distantes, de hecho, en el país es bastante común tipo de diseño que en ciertos tramos se encuentran cercanos a la carretera y se pueden observar de forma directa. Es necesario mencionar que esta alternativa consideró el transporte del  $CO_2$  cuando este se encuentra en fase líquida

### ***2.2.3 Transporte de Dióxido de Carbono Supercrítico a través de Tuberías***

Por último, se tomó en consideración nuevamente un sistema de tuberías para el transporte del fluido, sin embargo, en esta ocasión se propuso que el  $CO_2$  se encuentre en estado supercrítico; es decir, que sus propiedades tengan semejanza tanto como el fluido en estado gaseoso, y el fluido en estado líquido; sin embargo, que no sea ninguno de estos últimos dos estados mencionados.

#### **Figura 7**

*Transporte de  $CO_2$  a través de tuberías*



Fuente: (Nación Wampis (2018))

### 2.3 Matriz de decisión

Una matriz de decisión es un arreglo que sirve para elegir entre varias alternativas de solución, planteadas para resolver un problema, aquella que resulte ser la más adecuada para lo que se desea obtener. La elección de una de las alternativas se realiza tomando en consideración ciertas variables conocidas como criterios de diseño, a las cuales se les asigna un porcentaje de acuerdo con su nivel de importancia. Posteriormente se otorga una calificación, por lo general del 1 al 10, a cada alternativa considerando cada uno de los criterios de diseño, calificación que luego se pondera respecto al porcentaje de cada criterio, para finalmente obtener una calificación final asignada a la alternativa de solución.

Para elaborar la matriz de decisión de este proyecto se tomó en consideración los siguientes criterios:

**Costo del diseño:** Como en todos los diseños el costo es una consideración importante, sin embargo, hay que considerar que el mejor diseño no es aquel más barato, pues esto podría ocasionar posteriores accidentes que incurran en costos de reparación elevados. Para grandes proyectos como el transporte de un fluido entre dos puntos lejanos, existen criterios más importantes que el costo, por ello se le asignó un porcentaje del 20% a este criterio.

**Seguridad del diseño:** Se consideró que este criterio es el más importante, puesto que al manipular un fluido considerado como peligroso en grandes cantidades, se debe contar que la probabilidad de accidentes sea mínima, y el proceso en sí sea seguro; por ello se le ha asignado un porcentaje de 30% a este criterio.

**Facilidad de mantenimiento:** El criterio de mantenimiento siempre es importante en cualquier diseño, en este caso al tratarse de un sistema de transporte bastante extenso, el

mantenimiento se encuentra a cargo de personas especializadas con basto conocimiento en el tema, por ello se le asignó un porcentaje de 20%.

**Amigable con el medio ambiente:** Todas las empresas que operan en la actualidad deben considerar el impacto de sus instalaciones o productos con el medio ambiente, por ello se le ha asignado un porcentaje del 10%

**Continuidad del proceso:** Este criterio se refiere a la operación del sistema de manera continua, es decir, sin interrupciones, lo cual es muy importante por ello se le asigno un porcentaje de 25%.

Ahora bien, se procedió a darle una calificación a cada alternativa de solución tomando en cuenta cada uno de los criterios de diseño, esta calificación fue un valor entre 1 y 10, que posteriormente se multiplica por el porcentaje correspondiente, para finalmente sumarse entre ellos y obtener el valor final de calificación para cada alternativa, el mismo que se encuentra entre 1 y 10.

La alternativa de solución que resultó ganadora con un puntaje de 7,35 corresponde al transporte de  $CO_2$  capturado en estado supercrítico a través de un sistema de tuberías desde Pichincha hasta Shushufindi,

La Tabla 1 muestra la matriz de decisión y cada una las calificaciones asignadas a cada alternativa de solución.

**Tabla 1***Matriz de decisión*

Alternativas de solución	Criterios de diseño					Total
	Costo de diseño	Seguridad del diseño	Facilidad de mantenimiento	Amigable con el medio ambiente	Continuidad del proceso	
	15%	30%	20%	10%	25%	
<b>1</b> Transportar el $CO_2$ capturado, en estado gaseoso o líquido, mediante tanqueros por vía terrestre.	8	2	8	3	4	4,7
Calificación	1,2	0,6	1,6	0,3	1	
<b>2</b> Transportar el $CO_2$ capturado, en estado líquido a través de un sistema de tuberías desde pichincha hasta Shushufindi	2	7	7	4	9	6,45
Calificación	0,3	2,1	1,4	0,4	2,25	
<b>3</b> Transportar el $CO_2$ capturado, en estado supercrítico a través de un sistema de tuberías desde pichincha hasta Shushufindi.	4	9	7	4	9	7,35
Calificación	0,6	2,7	1,4	0,4	2,25	

#### 2.4 Selección de tubería

Para la selección del material de la tubería se consideró aspectos como la presión del fluido, la resistencia a la corrosión, la facilidad para instalar accesorios, y la menor posibilidad de que existan fugas, por ello; la tubería de acero al carbono, específicamente la ASTM A106 sin costura, fue la elegida para el transporte de  $CO_2$  en estado supercrítico, a continuación, se

detallan algunos de los aspectos mencionados previamente que apoyaron la elección de este material para la tubería.

- Resistencia a altas presiones: El  $CO_2$  en estado supercrítico se caracteriza por operar a presiones y temperaturas elevadas. El acero al carbono se destaca por su elevada resistencia a la presión, lo que lo hace adecuado para soportar las exigentes condiciones del transporte de  $CO_2$  supercrítico mediante tuberías.
- Alta resistencia mecánica: El acero al carbono exhibe una excelente resistencia mecánica, lo que implica que puede soportar cargas y tensiones sin deformarse o fracturarse con facilidad. Esta cualidad resulta crucial en el transporte de  $CO_2$  supercrítico, puesto que las tuberías deben ser capaces de soportar tanto la presión interna como las cargas externas.
- Buena resistencia a la corrosión: El  $CO_2$  en estado supercrítico puede tener un efecto corrosivo en determinados materiales, especialmente en presencia de trazas de impurezas. No obstante, el acero al carbono exhibe una buena resistencia a la corrosión, especialmente cuando se combina con revestimientos protectores adecuados. Esto contribuye a prevenir la corrosión y el deterioro de las tuberías durante el transporte de  $CO_2$  supercrítico.
- Disponibilidad y costos: El acero al carbono es ampliamente utilizado en la industria y se encuentra fácilmente disponible en el mercado. Por consiguiente, representa una opción práctica y económica para el transporte de  $CO_2$  supercrítico en comparación con materiales más especializados y costosos.

Las consideraciones mencionadas previamente fueron respaldadas mediante los documentos emitidos por la empresa Proveedor de Suministros Industriales (Promigpart, 2016), la misma que mencionó algunas características del Acero al Carbono ASTM A106, que se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 2**

*Características del Acero al Carbono ASTM A106*

<b>Diámetro nominal</b> [in]	<b>Diámetro Exterior</b> [in]	<b>Espesor de pared</b> [in]	<b>Rugosidad</b> [mm]	<b>Presión máxima admisible de operación</b> [PSI]	<b>Límite de presión interna</b> [PSI]	<b>Presión de colapso</b> [PSI]
6	6.62	0.28	0.03	2650	3230	3280

Fuente: (Promigpart, 2016)

Es necesario mencionar que además del acero descrito previamente, otra opción de material de tubería fue el acero ASTM A53 para el transporte de  $CO_2$ , cuyas especificaciones son similares, y la mayor diferencia que existen entre ellos es que el A106 está diseñado para soportar temperaturas elevadas de hasta  $400^\circ C$ , mientras que el ASTM A53 soporta temperaturas menores.

Cabe destacar que, si bien el acero al carbono es un material comúnmente empleado en el transporte de  $CO_2$  supercrítico, resulta imprescindible adoptar medidas adicionales para prevenir la corrosión y garantizar la seguridad del sistema. Tales medidas incluyen el monitoreo regular, la aplicación de recubrimientos protectores y la implementación de prácticas de mantenimiento adecuadas.

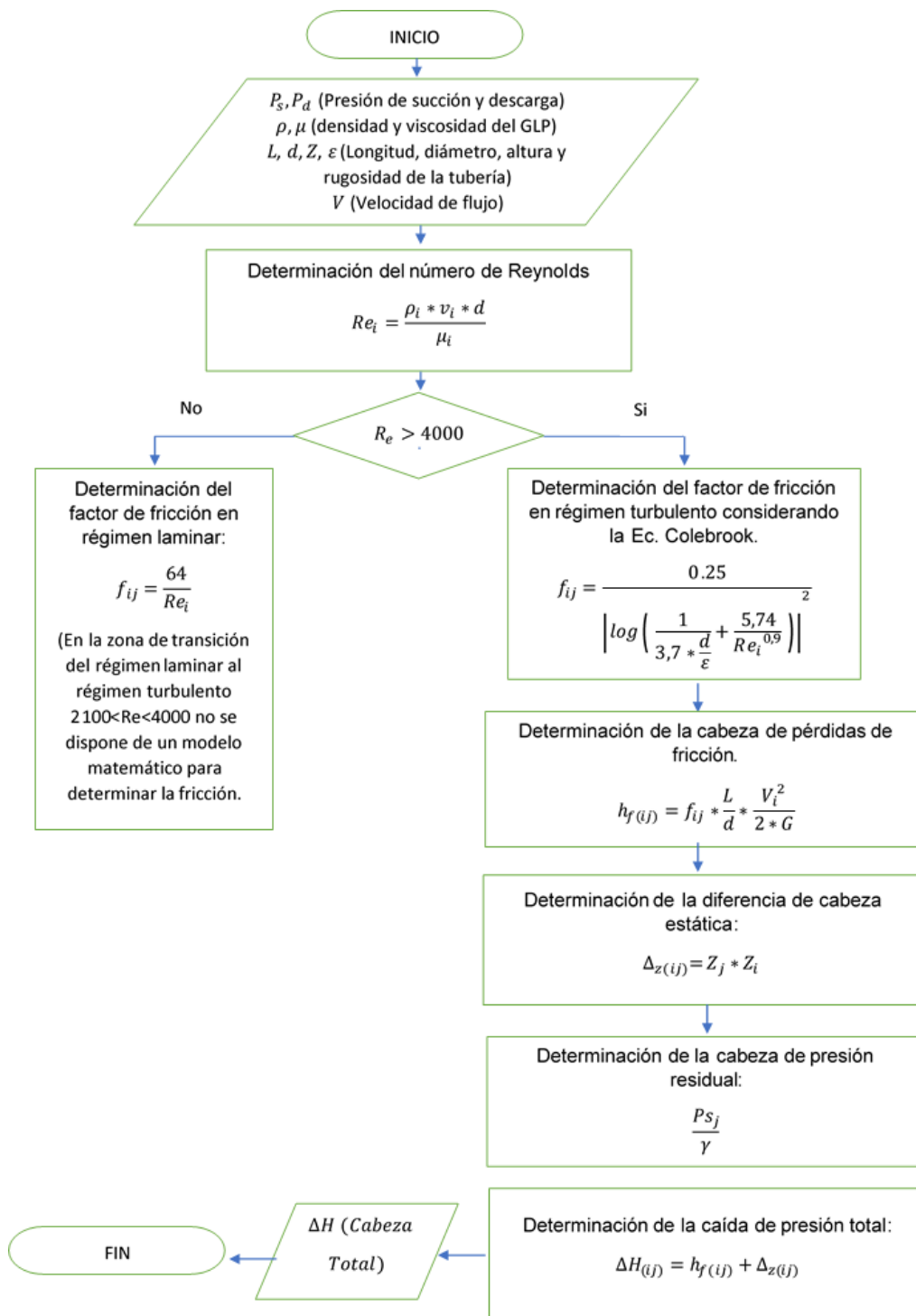


## **Determinación de las pérdidas energéticas del GLP en cada tramo del poliducto**

Para el desarrollo de cada uno de los procesos que conlleva el uso de las fórmulas de la literatura correspondiente a Termo-fluidos, termodinámica entre otros, se adapta las diferentes ecuaciones que se dejan plasmadas mediante diagrama de flujo, mismas que el software incluye para la resolución del sistema de transporte. Así se ha determinado el método matemático para calcular las pérdidas energéticas. Este proceso matemático fue desarrollado siguiendo las especificaciones de la norma ASME B31.4 (2002) titulada "Tuberías de transporte de hidrocarburos líquidos y otros líquidos", junto con las directrices del manual PDVSA-L-TP-1.5 (2000, p. 8), tal como se describe en el diagrama de flujo de la Figura 8 (Shashi, 2004, p. 29; Kayode, 2007).

Figura 8

Diagrama de flujo



## 2.5 Simulación de Procesos

Se entiende como simulación de procesos a la actividad que tuvo como objetivo representar un sistema mediante una plataforma informática que permitió experimentar y evaluar el comportamiento del sistema cuando se alteraron sus propiedades; en otras palabras, la simulación de procesos sirvió para mejorar proyectos logísticos o productivos ya existentes, y también para diseñar de manera eficiente nuevos sistemas. La simulación de procesos que fue usada en esta investigación se realizó con la ayuda del Software Aspen Plus, que según lo que indicó (Espínola, 2021), es un software bastante popular en el mercado de simuladores de procesos químicos, y que permite, entre otras funciones, reproducir en el ordenador procesos reales de producción, ofrece una gran variedad de propiedades físicas ya sea de compuestos puros y sus mezclas, es posible la construcción de un diagrama de flujos del proceso, evita cálculos numéricos complejos, se puede editar las condiciones iniciales, intermedias o finales de un sistema para observar cómo estas afectan todo el proceso, y resuelve problemas complicados de termodinámica.

Es necesario mencionar que la ESPOL cuenta con licencia para utilizar este software, por ello, todas las simulaciones fueron realizadas en los equipos que se encuentran dentro del laboratorio de computación de la facultad.

### 2.5.1 *Modelo termodinámico para la simulación*

Los modelos termodinámicos son paquetes de datos que sirven para calcular de manera rápida las propiedades termodinámicas de los compuestos que ayuden a resolver balances de energías en los diversos equipos termodinámicos, como bombas, turbinas, compresores, intercambiadores de calor, entre otros, así como la simulación y dimensionado de estos equipos.

Los métodos termodinámicos se pueden agrupar, de manera general, en cuatro grupos: Ecuaciones de estado (EOS), Modelos de coeficiente de actividad (LACM), Modelos combinados (EOS-LACM), y Correlaciones especiales para sistemas específicos; La variedad de estos métodos se basa en las diversas propiedades físicas y termodinámicas de los fluidos y sus mezclas, que se rigen por las fuerzas intermoleculares, las cuales al incrementarse, se alejan del comportamiento ideal, volviendo la simulación cada vez más compleja (Villanueva, 2010).

La importancia de la elección del modelo termodinámico radica en que este debe realizar predicciones correctas de las propiedades físicas de los fluidos, en función de su presión y temperatura; además, cada método es adecuado solo para determinados tipos de componentes, y se limitan a otras condiciones de funcionamiento; cuando se realiza la elección de un método incorrecto, se pueden obtener resultados incorrectos.

Para efectos de este proyecto se ha elegido el grupo de Ecuaciones de estado (EOS), puesto que los métodos pertenecientes a este grupo sirven para modelar fluidos puros y mezclas de moléculas apolares, especialmente hidrocarburos, además este tipo de métodos permiten tratar de manera unificada la fase líquida y vapor de una mezcla en un amplio rango de presión y temperatura.

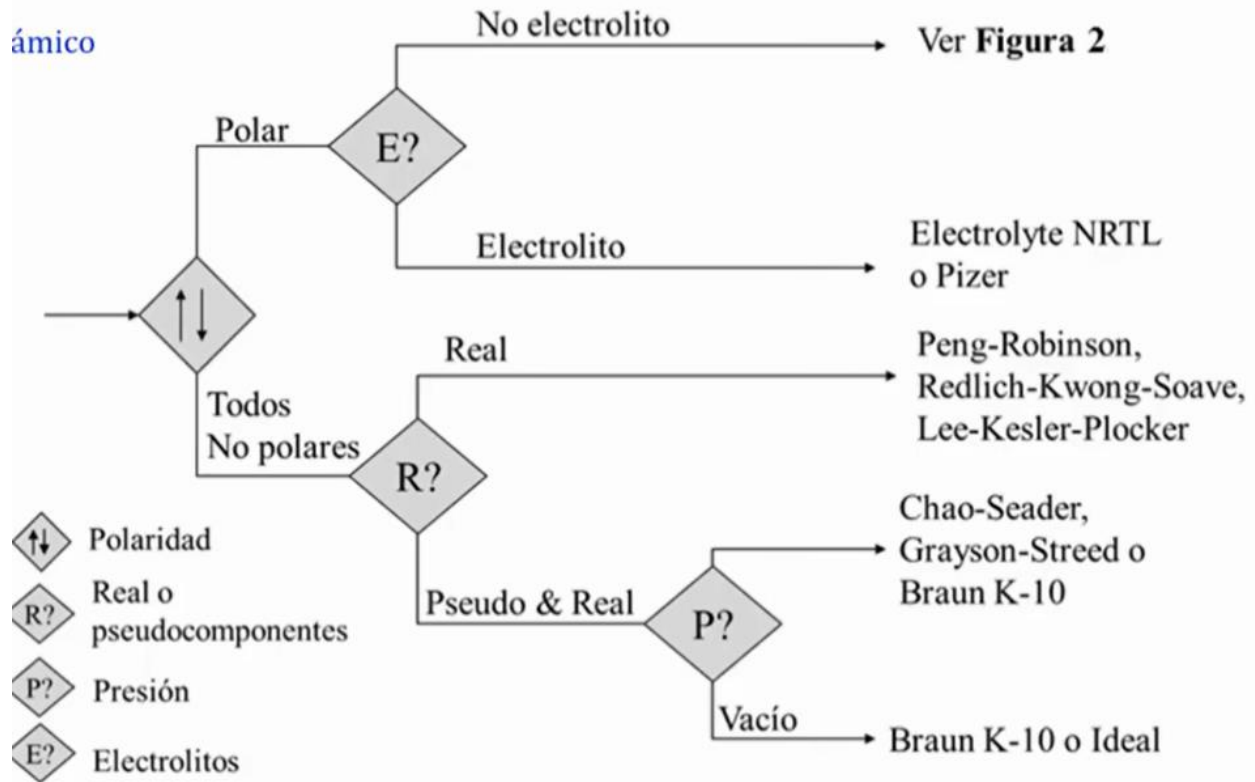
### **2.5.2 Método Lee – Kesler – Plocker (LK PLOCK)**

Se ha elegido este método, puesto que pertenece al grupo (EOS) que son óptimos para tratar con hidrocarburos, y que permite estimar la presión de vapor de todos los componentes que forman el sistema y que como propiedades de entrada se conoce la presión y temperatura crítica.

De acuerdo con el asistente de métodos, herramienta propia del software Aspen plus, recomienda el uso LK PLOCK cuando se está realizando simulaciones con hidrocarburos.

**Figura 9**

Diagrama para elección del método a usar en el Software Aspen Plus



Fuente: (Espínola, 2020)

El sistema de propiedades físicas de Aspen emplea automáticamente una serie de parámetros binarios para caracterizar las interacciones entre diferentes componentes. Para explorar estos parámetros binarios predefinidos, se puede acceder al formulario de interacción binaria del parámetro de propiedad LKPKIJ-1. Asimismo, en casos donde no se disponga de estos parámetros predefinidos, es posible recurrir al Sistema de Regresión de Datos (DRS), el cual permite determinar los parámetros binarios a partir de datos experimentales de equilibrio de fase, usualmente datos de equilibrio líquido-vapor (VLE).

Además de esta funcionalidad, el sistema de propiedades incluye correlaciones integradas que facilitan el cálculo de parámetros binarios entre diversos componentes, tales como  $CO$ ,  $CO_2$ ,

$N_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ , alcoholes e hidrocarburos. En casos donde los componentes no se ajusten a las categorías mencionadas, se asume que se trata de hidrocarburos.

Tipo de mezclas: Para mezclas que presenten características no polares o ligeramente polares, se recomienda utilizar el método de propiedad LK-PLOCK. Entre los ejemplos de este tipo de mezclas se encuentran los hidrocarburos y los gases ligeros, como el dióxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno y el hidrógeno.

Rango de aplicabilidad: Los resultados obtenidos a través del método de propiedad LK-PLOCK son consistentes en un amplio rango de temperaturas y presiones. Este método mantiene su coherencia incluso en la región crítica, y se caracteriza por no presentar comportamientos anómalos, a diferencia de los enfoques basados en coeficientes de actividad. No obstante, es importante señalar que los resultados pueden ser menos precisos en la proximidad al punto crítico de la mezcla.

## **2.6 Sistema de transporte de $CO_2$ capturado**

Para la simulación del sistema de transporte de  $CO_2$  se consideró el uso del software ya mencionado ASPEN PLUS a fin de cumplir con los siguientes objetivos:

- El objetivo es desarrollar un modelo de transporte eficiente y preciso de manera que se viable para el desarrollo sostenible. Para lograr esto, es crucial que las presiones de descarga obtenidas mediante simulaciones presenten un error menor al  $\pm 5\%$  (con un nivel de confianza del 95%) en comparación con los registros reales de presión en el campo (Calvo, 2017).
- Se pretende investigar cómo la densidad y el estado del  $CO_2$  supercrítico en el poliducto varían en función de los cambios de presión y temperatura.

- Se busca determinar las presiones mínimas de descarga en las estaciones de bombeo que garanticen que el  $CO_2$  se encuentre en condiciones supercríticas a lo largo del sistema de tuberías.

## 2.7 Diseño de estaciones de bombeo

### 2.7.1 Conjunto de válvulas

**2.7.1.1 Válvula de compuerta.** Las válvulas de compuerta son comúnmente empleadas en situaciones que requieren una pérdida de carga mínima y un flujo sin restricciones. En su estado completamente abierto, estas válvulas ofrecen una vía despejada para el paso del fluido, lo que resulta en una pérdida de carga extremadamente baja. Se utilizan comúnmente en sistemas donde se requiere un cierre hermético y un control preciso del flujo, como en redes de suministro de agua, plantas de tratamiento de aguas residuales, sistemas de distribución de gas, plantas químicas, refinerías de petróleo y muchas otras aplicaciones industriales.

Cuando la válvula de compuerta está completamente abierta, proporciona un paso total para el fluido sin obstrucciones significativas. Esto permite un flujo eficiente y una pérdida de carga muy baja, lo que es fundamental en los oleoductos para minimizar la resistencia al flujo y maximizar la capacidad de transporte.

**2.7.1.2 Válvula de Globo.** Una válvula de regulación tipo globo utiliza un desplazamiento lineal para mover un elemento de cierre hacia adentro y afuera de una superficie de sellado. Estas válvulas poseen un cuerpo que se caracteriza por tener una cavidad en forma esférica alrededor de la zona del puerto, y están diseñadas para controlar el flujo del proceso cuando se utilizan en conjunto con un conjunto de actuador. Muchos de estos cuerpos de válvulas utilizan una construcción estilo retén o jaula para asegurar el anillo de sellado, proporcionar una guía para el tapón de la válvula y permitir ajustar las características de flujo

específicas de la válvula. Los cuerpos de válvula individuales con estilo de retén o jaula también pueden ser fácilmente modificados mediante el cambio de componentes internos para ajustar las características de flujo, reducir la capacidad de caudal, atenuar el ruido o eliminar la cavitación.

Estas válvulas tendrían un cuerpo que incorpora una cavidad esférica alrededor del puerto para facilitar el flujo del  $CO_2$  supercrítico. Al emplear un conjunto de actuador en combinación con estas válvulas, se lograría un control óptimo del flujo del  $CO_2$  a través del sistema de tuberías.

En el diseño de estas válvulas para el transporte de  $CO_2$  supercrítico, se podría optar por utilizar una construcción estilo retén o jaula que asegure el anillo de sellado, brinde una guía precisa para el movimiento del tapón de la válvula y permita ajustar las características de flujo específicas requeridas para el transporte de  $CO_2$  supercrítico. Además, sería posible realizar modificaciones en los cuerpos de válvula individuales mediante la sustitución de componentes internos, con el fin de ajustar el flujo, reducir la capacidad de caudal, mitigar el ruido o eliminar posibles efectos de cavitación durante el transporte del  $CO_2$  supercrítico en el sistema de tuberías.

### **2.7.2 Equipo motriz**

Los motores eléctricos utilizados en compresores suelen ser motores de corriente alterna (AC) de inducción, debido a su amplia disponibilidad, eficiencia y capacidad para ofrecer un torque inicial elevado. Estos motores convierten la energía eléctrica en energía mecánica, que impulsa el compresor para comprimir el fluido o gas de trabajo.

En cuanto a su diseño, los motores eléctricos para compresores suelen tener características especiales, como una carcasa robusta y resistente para soportar las condiciones de trabajo adversas y protección adicional contra la humedad y el polvo.



También pueden contar con sistemas de enfriamiento, como ventiladores o intercambiadores de calor, para garantizar un funcionamiento adecuado y evitar el sobrecalentamiento.

### **2.7.3 Compresor**

El compresor que se ha elegido debe cumplir ciertas especificaciones como por ejemplo aumentar la presión del gas para mantener un flujo constante a lo largo del gasoducto y superar las pérdidas de presión causadas por la fricción y la resistencia al flujo.

La selección de un compresor adecuado para un gasoducto depende de varios factores, incluyendo el volumen de gas a transportar, la presión de entrada y salida requerida, la temperatura del gas, entre otros. Además, es importante considerar la eficiencia energética del compresor, ya que el consumo de energía en el proceso de compresión puede ser significativo. Los compresores utilizados en gasoductos suelen ser compresores centrífugos de gran tamaño y alta capacidad.

## **CAPÍTULO 3**

### 3.1 Resultados y Análisis

#### 3.1.1 Simulación del sistema de transporte

Es necesario recordar que la alternativa de solución elegida fue el transporte de  $CO_2$  capturado en estado supercrítico a través de un sistema de tuberías desde Pichincha hasta Shushufindi, sin embargo, a partir de dicha alternativa, se consideró dos variantes para el diseño: tubería con aislante térmico, y tubería sin aislante térmico.

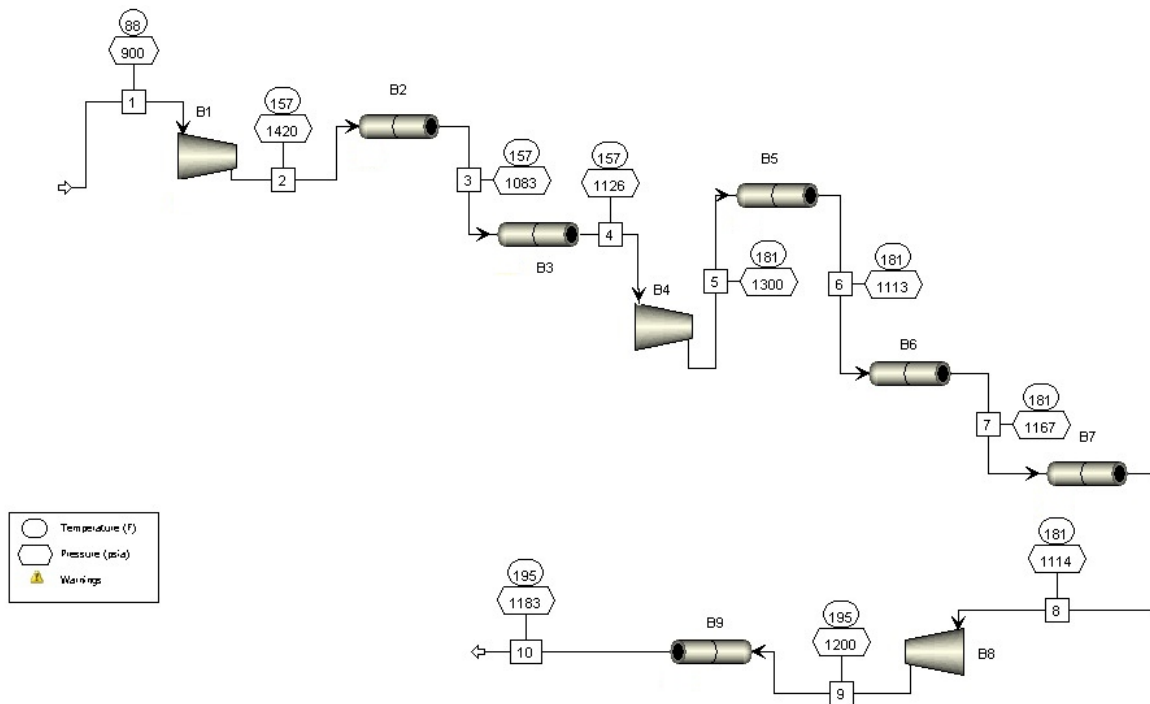
Para llegar a los resultados finales fue necesario realizar múltiples iteraciones, y así obtener respuestas adecuadas a lo largo de la trayectoria considerada. La Figura 10 representa la primera variante de la alternativa de solución que fue elegida, es decir, el sistema de tuberías con aislante térmico, el diagrama mostrado fue una simulación de transporte del  $CO_2$  en estado supercrítico, que muestra encima de cada componente, y sección, los valores de presión y temperatura a los que se encuentra el fluido transportado. El dimensionamiento del poliducto se realizó tomando en consideración la información general contenida en manuales técnicos desarrollados por EP Petroecuador, de donde se extrajeron datos puntuales sobre coordenadas, altura sobre el nivel de mar y distancias entre cada tramo que existe entre Pichincha y Shushufindi, y, que después de tratarlos mediante cálculos sencillos, fue posible ingresar estos datos en el software, y así obtener resultados relevantes para la investigación.

En la primera variante de la alternativa de solución se consideró un sistema de tuberías de acero al carbono que incluyen un aislante térmico, de manera que se evitó las pérdidas de calor, para evitar la disminución de la temperatura, y así garantizar que el  $CO_2$  se mantengan dentro de las condiciones de estado supercrítico, es decir, valores de temperatura y presión superiores a  $31^\circ C$  y 1070 Psi respectivamente; generando un mayor control en cada una de las estaciones de bombeo. Además, al reducir las pérdidas o ganancias de calor dentro y fuera de los sistemas de

tuberías, se traduce a un ahorro significativo de ahorro de energía y costos operativos, dado que, al contar con un sistema completamente aislado, no se requiere que el compresor sea de capacidad muy grande para reestablecer las temperaturas adecuadas a lo largo de la trayectoria. Otro factor importante dentro de la solución es que se disminuye en cierto modo el riesgo de condensación y disminuye el crecimiento microbiano y otros daños que se relacionan a la humedad.

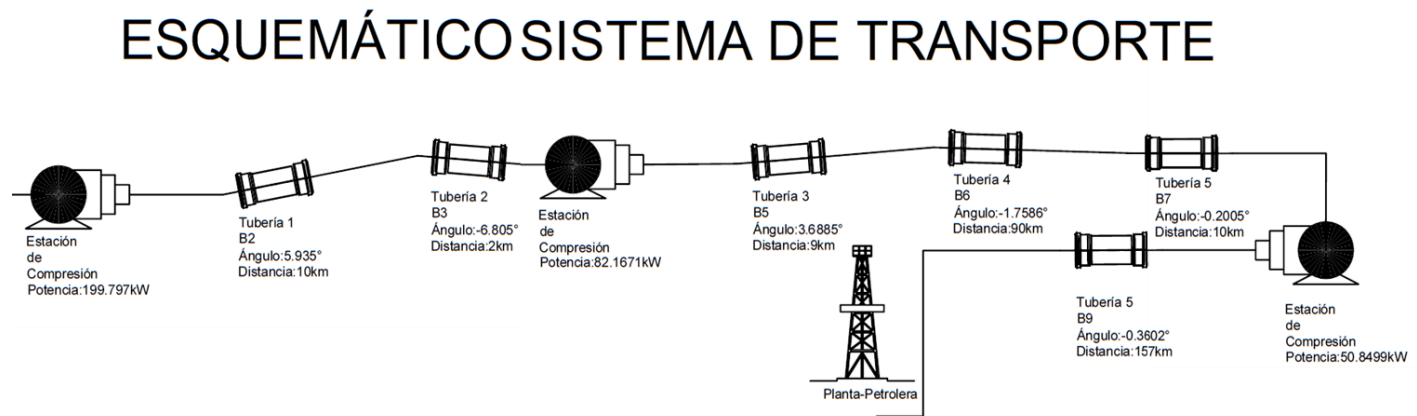
**Figura 10**

*Diseño del sistema de transporte de CO<sub>2</sub> (Tuberías aisladas)*



**Figura 11**

*Esquemático del sistema de transporte*



Entre los aspectos de importancia que fueron considerados están: la distancia de transporte del fluido, es decir aproximadamente 287km, los ángulos de inclinación aproximados del terreno, y por ende de la tubería, la distancia entre estaciones de bombeo y el aislante térmico a lo largo de la trayectoria. Bajo todos estos parámetros se obtuvieron resultados que satisfacen las necesidades y sobre todo los objetivos del proyecto y que permitieron estimar un resultado óptimo y eficiente para su diseño.

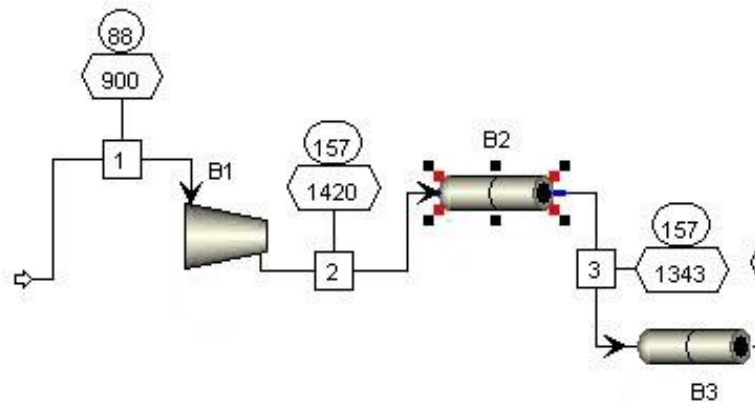
A continuación, se presentan los resultados en detalle, de cada uno de los componentes y secciones trazadas:

Componente B1. El primer componente representa la primera estación de bombeo, que se tratará más adelante, en esta se encuentra un compresor, el cual opera a 199,80 kW de potencia necesaria para que el CO<sub>2</sub> se comporte en estado supercrítico bajo las condiciones de temperatura y presión de 157°F y 1420 psi misma que alcanza a transportar un máximo de 10 km a lo largo de la tubería, que se encuentra aislada térmicamente.

Componente B2. El segundo componente es la tubería la cual tiene una longitud de 10 km aproximadamente, cuenta con aislante térmico de alta eficiencia como lo es las coquillas de lana de vidrio de ISOVER, de acuerdo con las normas específicas que se requieren para el transporte de  $CO_2$ . Mediante esta tubería se transporta el  $CO_2$  el cual llega a la salida de su trayectoria a  $153^\circ F$  y a 1083 psi siendo condiciones óptimas para el estado del  $CO_2$ . Adicional a esto es importante resaltar que durante la trayectoria la presión inicial a la salida del compresor que fue de 1420 psi se va distribuyendo a lo largo de la trayectoria, de manera que se va reduciendo con el paso del tiempo y distancia, por tal razón las iteraciones que se trabajaron en cada uno de los componentes son con el objetivo de alcanzar el estado supercrítico en cada punto exacto, esto podemos observarlo en la Figura 11, donde notamos el comportamiento del  $CO_2$  a 1km de distancia, donde se evidencia como la presión empieza a decrecer a un valor de 1343 psi. Finalmente, notamos que las temperaturas se mantienen en cada uno de los tramos B1 y B2, esto se da por acción del aislante térmico que envuelve la tubería, y que de cierta forma hace que el proceso sea de tipo isotérmico.

### Figura 12

*Tramo del diseño de transporte*



Componente B3. El tercer componente es una configuración de tubería aislada térmicamente, pero esta cuenta con diferente configuración de la anterior, tanto en el ángulo de trayectoria, como en la distancia. Para este caso la distancia es de aproximadamente 2km, la selección de esta distancia de tubería se debe a que presenta una diferente topografía del terreno. De manera que, si la tubería tiene mayor distancia que la propuesta, la presión a la salida del  $CO_2$  no cumple con las condiciones del estado supercrítico por ende se cambia dicha configuración. Para este caso tendremos una presión de 1128 psi a la salida y una temperatura constante de  $157^{\circ}C$ .

Componente B4. Para este caso, se emplea una nueva estación de bombeo, donde se presenta un nuevo compresor con potencia de 82,17 kW, debido a que la presión del  $CO_2$  en este punto llega con propiedades por debajo del estado supercrítico requiere de un suministro de potencia para elevar nuevamente la presión y que siga su trayectoria, esto se debe a múltiples factores entre ellos la altura sobre el nivel del mar dada la topografía del terreno y la distancia del siguiente tramo.

Componente B5. El quinto componente representado por una tubería aislada térmicamente con una distancia de 9km, cuenta con un ángulo positivo dado que existe una elevación debido a la topografía del terreno, por tal razón con ayuda de la estación de bombeo antes mencionada, se logra obtener a la salida de este una temperatura  $181^{\circ}F$  dado que al aumentar la presión por el compresor también aumenta la temperatura y no se pierde calor por el tema del aislante, por otro lado, la presión alcanza los 1113 psi.

Componente B6. El sexto componente es una tubería así mismo aislada térmicamente, pero con diferente configuración, con una distancia de 90 km. En este caso, se empieza a aprovechar la inercia del terreno dado que se muestra de forma descendiente favoreciendo así el

paso del  $CO_2$ , generando una mayor operación de nuestro sistema y un ligero incremento en las presiones con valor de 1167 psi y una temperatura constante de 181°F.




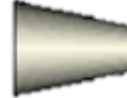





Componente B7. Esta tubería aislada térmicamente de 10 km de distancia tiene un pequeño ángulo de inclinación para aprovechar al máximo la configuración del terreno, para este caso ya la presión empieza a descender a 1114 psi y la temperatura se mantiene constante.

Componente B8. Aplicamos una última estación de bombeo para mediante un compresor de 50,85 kW y con ayuda de la pendiente del terreno, aprovechamos una presión de 1200 psi a la salida y una temperatura de 195°F

Componente B9. Finalmente, se presenta una tubería de 157 km, que con ayuda de la configuración y el compresor aseguramos que a la salida de esta se mantenga una presión de 1183 psi y una temperatura de 195°F, ideal para suministrar en los yacimientos petroleros y generar un nuevo mecanismo de extracción y producción.



**Tabla 3***Componentes de sistema de transporte con tuberías aisladas*

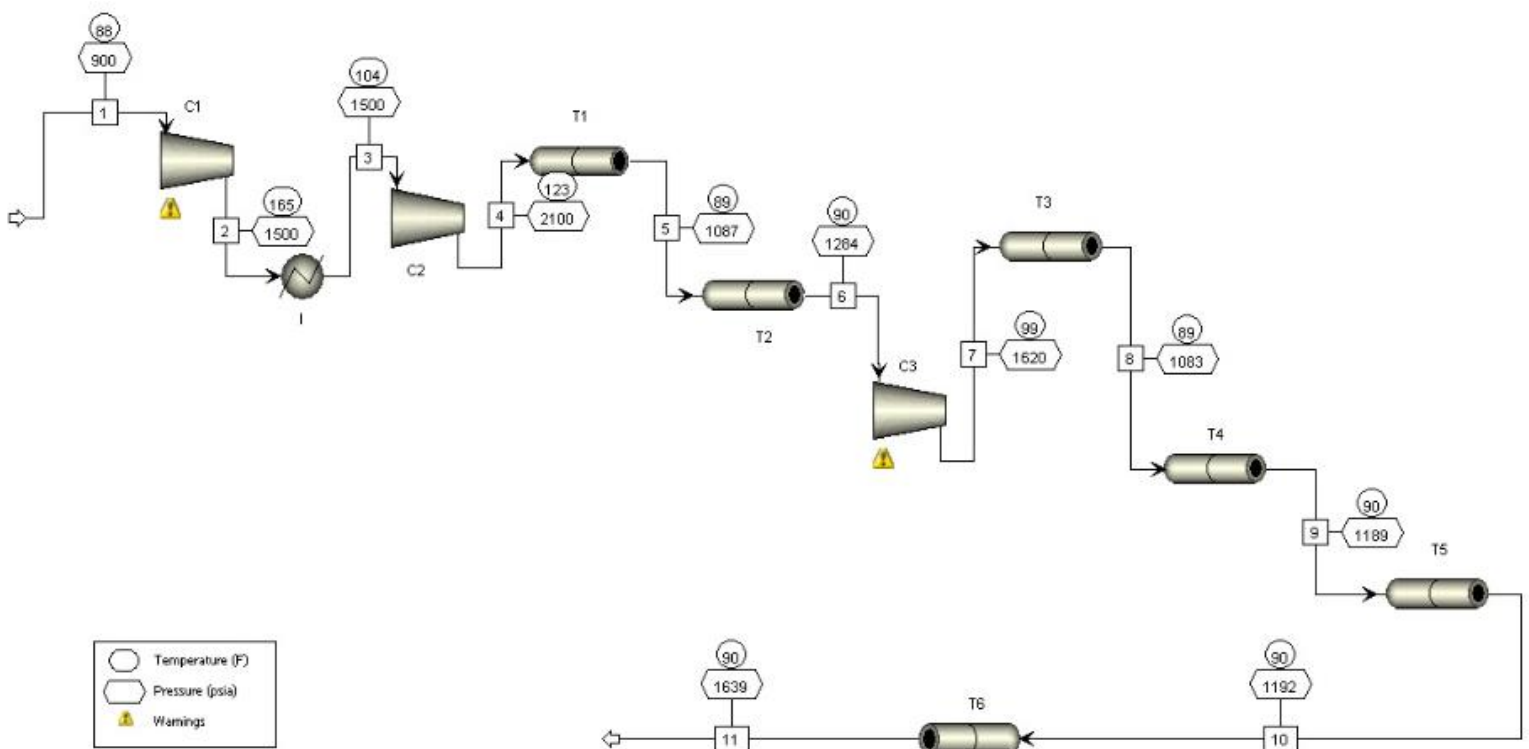
Componente	Variables					Potencia [kW]
	Ti [°F]	To [°F]	Pi [Psi]	Po [Psi]	Angulo [°]	
B1 	88	157	900	1420		199,797
B2 	157	157	1420	108.	5.935	
B3 	157	157	1083	1126	-6.805	
B4 	157	181	1126	1300		82,1671
B5 	181	181	1300	113	3.6885	
B6 	181	181	1113	1167	-1.7586	
B7 	181	181	1167	1114	-0.2005	
B8 	181	195	1114	1200		50,8499
B9 	195	195	1200	1183	-0.3602	

Con respecto a la segunda solución, donde no se consideró un revestimiento con aislante térmico, y por lo tanto existió transferencia de calor entre la tubería y los alrededores, fue

necesario el uso de un componente adicional con la intención de optimizar el proceso. El componente referido fue un intercambiador de calor [I], cuya representación se puede observar en la Figura 10, en compañía de los demás componentes a lo largo de la trayectoria. La función principal del intercambiador de calor, fue reducir la temperatura para que los compresores no presenten valores extremos de potencia requerida para su funcionamiento, sin embargo, aún con el uso de este intercambiador de calor, las potencias requeridas por los compresores resultaron ser elevadas, razón por la cual el software lanzó señales de advertencia en los componentes C1 y C3, que se pueden evidenciar en la Figura 12, a continuación se realiza una descripción de cada componente usado en esta propuesta de diseño sin revestimiento térmico.

**Figura 13**

*Diseño del sistema de transporte de CO<sub>2</sub> (Tuberías sin aislante)*



La trayectoria del  $CO_2$  capturado inició en la salida de la planta de generación de energía, donde su temperatura y presión fueron de  $88^\circ F$  y  $900\text{psi}$  respectivamente, es decir, en este punto el fluido se encontraba en estado gaseoso, por tanto, la primera acción necesaria fue llevarlo a estado supercrítico elevando su temperatura y presión, para lo cual fue necesario el uso del primer compresor (C1) que con una potencia de  $203\text{kW}$ , elevó la temperatura a  $165^\circ F$  y la presión a  $1500\text{psi}$ , garantizando el estado supercrítico del fluido para su transporte. Ahora bien, antes de iniciar con el recorrido, es necesario elevar aún más la temperatura y presión para poder alcanzar una altura de aproximadamente  $4000$  metros sobre el nivel del mar (msnm), para hacer esto de manera directa se necesita un compresor de gran potencia, lo cual influye en el incremento del costo del diseño. Para evitar esto, se tomó en consideración el componente (I), un intercambiador de calor que disminuya la temperatura del fluido hasta  $104^\circ F$ , con el objetivo que el siguiente componente no necesite una elevada potencia para incrementar los valores de temperatura y presión; cabe recalcar que el fluido caliente del intercambiador de calor puede ser usado en un proceso complementario de calentamiento de agua o de calefacción, necesario en lugares de la sierra, donde la temperatura disminuye considerablemente, especialmente por las noches.







Continuando con la descripción del proceso se tiene el compresor (C2), el cual eleva la temperatura y presión hasta  $123^\circ F$  y  $2100\text{psi}$  respectivamente; esto se hace con la finalidad que el fluido empiece su recorrido, de tal manera que pueda llegar hasta el punto más alto sin que ocurra un cambio de fase; lo cual se puede verificar en el siguiente componente, una tubería (T1) de  $10$  km de longitud que lleva el fluido desde los  $2200$  hasta los  $4000$  msnm, y que en su salida mostró valores de  $89^\circ F$  y  $1087\text{psi}$ ; valores que están al límite del punto crítico del  $CO_2$ , por tanto se caería en la tentación de adicionar un nuevo compresor para elevar estos valores y asegurar

que el fluido se mantenga en el estado deseado, sin embargo, no se realizó lo antes descrito, pues se aprovechó el perfil del terreno, que en este punto de la trayectoria empieza a descender considerando que el destino final, Shushufindi, se encuentra a una altura aproximada de 200 msnm; por lo tanto, el siguiente componente es una tubería (T2) de 2 km de longitud, cuya salida mostro valores de 90°F y 1264psi, es decir, valores superiores a la salida del componente anterior, lo cual se debe a la acción de la gravedad, puesto que en este punto la trayectoria empieza a descender. Apegándose a la realidad, y con la ayuda de las coordenadas de Petroecuador, se consideró que la trayectoria de bajada no es completamente perfecta, es decir, existen puntos donde la trayectoria comenzó nuevamente a subir, por lo tanto, el fluido necesitó de un compresor (C3) de 34,78kW que elevó la temperatura y presión hasta 99°F y 1620psi respectivamente; con ello fue suficiente para que el resto de la trayectoria fuese formada únicamente por tuberías, aprovechando que la trayectoria tiene una tendencia de bajada. La tubería (T3) de 9 km elevó el fluido de tal manera que en su salida los valores de temperatura y presión fueron de 89°F y 1083psi, muy cerca del punto crítico del  $CO_2$ , por ello, se aprovecha nuevamente la trayectoria de bajada, donde una tubería (T4) de 90 km de longitud permite que los valores de temperatura y presión se eleven hasta los 90°F y 1189psi respectivamente, después de esto, se considera otra tubería (T5) de 10 km de longitud donde la temperatura permaneció constante y la presión se elevó hasta los 1192psi. Finalmente, en el último trayecto de tubería (T6) de 157 km de longitud, que llega hasta la ciudad de Shushufindi, el  $CO_2$  llega con una temperatura de 90°F y una presión de 1639psi, valores que se encontraron por encima del punto crítico, asegurando que el fluido se encuentra en el estado deseado. En la Tabla se encuentra un resumen de todos los componentes usados en esta alternativa de diseño, con sus respectivos

valores de entrada y salida de temperatura y presión, y la potencia que necesitan, en los casos pertinentes.

**Tabla 4**

*Componentes del sistema de transporte con tuberías sin aislante*

Componente	Variables					Potencia [kw]
	Ti [°F]	To [°F]	Pi [Psi]	Po [Psi]	Angulo [°]	
C1 	88	165	900	1500		225.78
I 	165	104	1500	1500		
C2 	104	123	1500	2100		75.41
T1 	123	89	2100	1087	5.935	
T2 	89	90	1087	1264	-6.805	
C3 	90	99	1284	1620		38,65
T3 	99	89	1620	1083	3.6885	
T4 	89	90	1083	1189	-1.7586	
T5 	90	90	1189	1192	-0.2005	
T6 	90	90	1192	1639	-0.3602	

Para la elección de los accesorios se consideró la topografía del terreno, de acuerdo con las curvas de nivel se utilizaron diferentes accesorios que permitan un transporte seguro y eficiente. Teniendo en cuenta ciertos factores y consideraciones específicas.

**Control de flujo y presión:** En un sistema de transporte de  $CO_2$  a larga distancia, es importante mantener un control preciso del flujo y la presión del gas. Los reguladores de presión y las válvulas de compuerta se utilizan para regular y controlar la presión del  $CO_2$  a medida que se desplaza a lo largo de la tubería. Esto es fundamental para garantizar que el gas se transporte de manera segura y eficiente, evitando presiones excesivas que puedan comprometer la integridad del sistema.

**Reducción de pérdidas y fugas:** Las válvulas de compuerta se utilizan porque ofrecen un sellado hermético cuando están cerradas. Esto es esencial para prevenir fugas de  $CO_2$  a lo largo del sistema de tuberías, lo que puede ser peligroso.

**Requisitos específicos de la aplicación:** La elección de la cantidad de accesorios, incluidas las válvulas de compuerta, depende de los requisitos específicos de la aplicación y del diseño del sistema. La elección de la cantidad de válvulas de compuerta, codos y otros accesorios se basa en factores como la distancia, la presión requerida, la seguridad y la eficiencia del sistema.

**Cumplimiento normativo y seguridad:** Los sistemas de transporte de  $CO_2$  están sujetos a regulaciones y estándares de seguridad rigurosos. La elección de accesorios, incluidas las válvulas de compuerta, debe cumplir con estos estándares para garantizar la seguridad y el cumplimiento normativo.

**Tabla 5***Accesorios y longitudes de tuberías*

<b>ACCESORIOS</b>					
N°	Distancia [Km]	Regulador de Presión	Válvula de compuerta	Codos	Válvula Globo
B2	10	1	1	12	1
B3	2	–	2	8	1
B5	9	1	2	13	1
B6	90	–	18	150	1
<b>TOTAL</b>	278	3	57	392	6

Con la finalidad de que el diseño propuesto fuese una representación lo más cercana a la realidad posible, se tomó en consideración las pérdidas de energía a través de las paredes de la tubería; llegando así a la disyuntiva de usar o no aislamiento térmico; que posteriormente se resolvió con la realización de una matriz de decisión, la misma que se describe a continuación:

**Tabla 6***Matriz de decisión para elegir el uso de aislante*

Alternativas de solución válidas		Criterios de diseño					Total
		Eficiencia Energética	Control de Temperatura	Seguridad	Cumplimiento Normativo	Costos	
		20%	25%	20%	15%	20%	100%
1	Solución 1. Se implementa aislante térmico en las tuberías, para evitar las pérdidas de calor.	8	9	8	9	6	8,00
	Calificación	1,6	2,25	1,6	1,35	1,2	
2	Solución 2. Tuberías sin aislante térmico, con intercambio de calor.	7	6	7	8	8	7,10
	Calificación	1,4	1,50	1,4	1,20	1,6	

La matriz de decisión permite comparar y evaluar dos soluciones para el transporte de  $CO_2$  en modo supercrítico: la solución 1, que prevé el aislamiento de la tubería para evitar la pérdida de calor, y la solución 2, que prevé el uso de tuberías sin aislamiento. Hay intercambio de calor.

La solución 1 tiene varias ventajas significativas. En términos de eficiencia energética, el aislamiento de tuberías reduce la pérdida de calor durante el transporte, lo que garantiza un uso más eficiente de la energía y menores costos operativos. Además, el aislador permite controlar mejor la temperatura del  $CO_2$ , manteniendo más estable su estado supercrítico y evitando cambios bruscos que puedan afectar al proceso. La seguridad es otro aspecto importante para considerar. La Solución 1 proporciona un transporte de  $CO_2$  más seguro en condiciones



supercríticas, lo que reduce la pérdida de calor, reduce las fluctuaciones de temperatura y el riesgo de posibles fugas. Además, la solución puede cumplir con las normativas y estándares vigentes, ya que el uso de aislamiento térmico puede ser un requisito legal para el transporte de sustancias supercríticas.

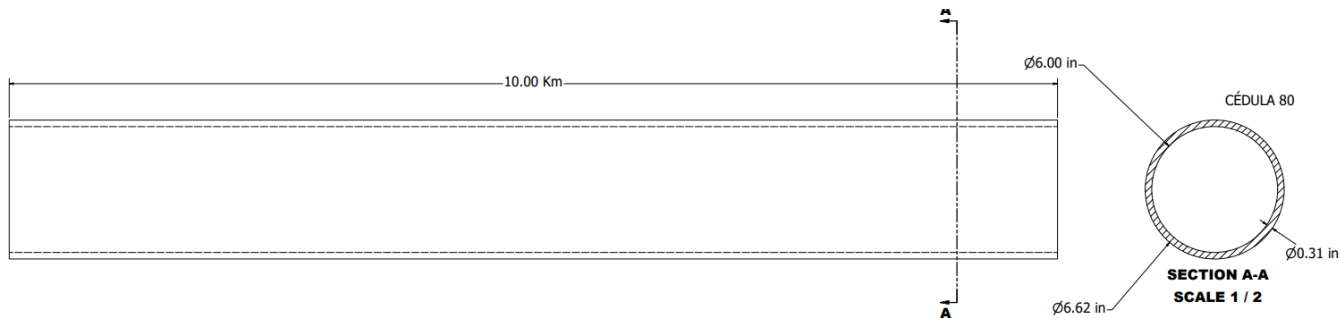
Desde una perspectiva de costos, la opción 1 implica la necesidad de instalar y mantener el aislamiento, que puede ser moderadamente costoso. Sin embargo, este costo se compensa con la eficiencia energética y los beneficios de seguridad que proporciona. Invertir en aislamiento puede generar ahorros significativos y una operación más rentable a largo plazo. Por otro lado, la solución 2 utiliza tuberías sin aislamiento y con intercambio de calor, lo que presenta ciertas limitaciones. En comparación con la solución 1, es menos eficiente energéticamente debido a la pérdida de calor durante el transporte. El control de la temperatura es deficiente, lo que provoca fluctuaciones y cambios en el estado supercrítico del  $CO_2$ . Sin aislamiento, aumenta el riesgo de fugas y problemas de seguridad. En función de las normativas específicas, es posible que esta solución no cumpla los requisitos legales para el transporte de  $CO_2$  en condiciones supercríticas.

Aunque la opción 2 puede estar asociada con menores costos de instalación y mantenimiento, vale la pena señalar que las pérdidas de eficiencia y los posibles riesgos asociados pueden generar costos operativos más altos a largo plazo. En conclusión, la solución 1 para el aislamiento de tuberías muestra claras ventajas en términos de eficiencia energética, control de temperatura y seguridad en el transporte de  $CO_2$  en modo supercrítico. Además, es más probable que cumpla con las normas y reglamentos aplicables. Si bien esto implica ciertos costos adicionales, estos costos son más que compensados por los beneficios obtenidos. Por otro lado, si las restricciones financieras son mayores, se puede considerar la opción 2, pero se debe evaluar que puede causar mayor riesgo y pérdida de eficiencia.

**3.2 Planos de tubería**

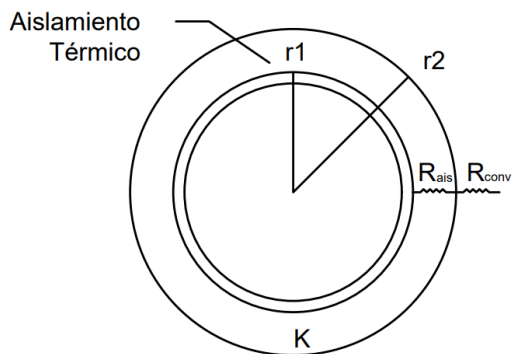
**Figura 14**

*Proyección de la sección lateral y frontal*



**Figura 15**

*Aislamiento térmico de la tubería*



**3.3 Estación de compresión**

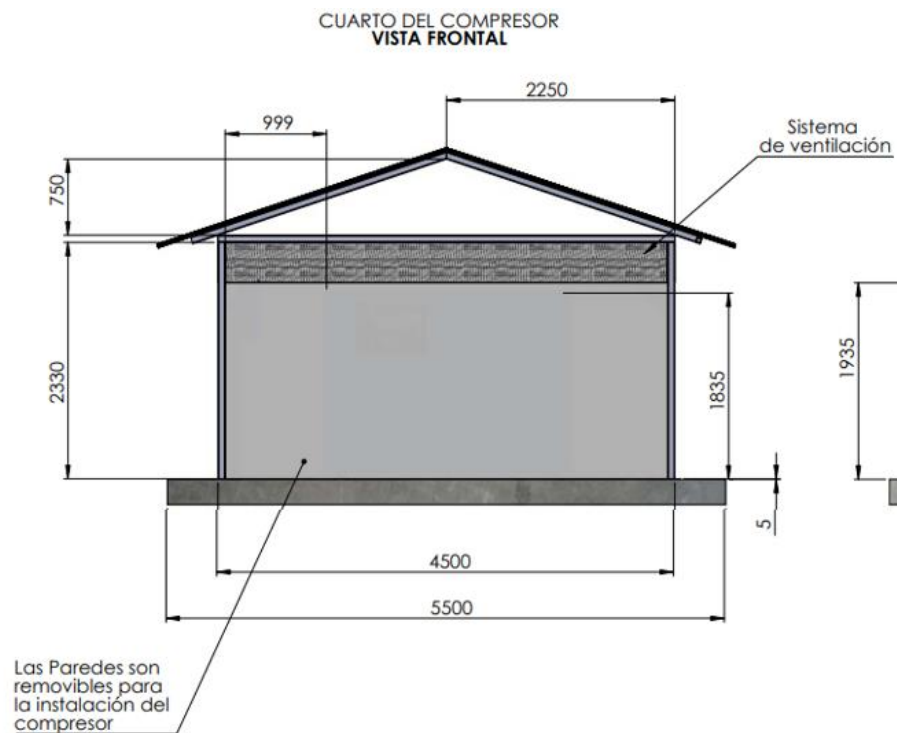
En estas estaciones se instalaron los compresores, es decir, el número de estaciones fueron un total de tres a lo largo de la trayectoria. Es importante mencionar que además de servir para albergar y proteger al compresor de las inclemencias del clima, también contiene el panel de control, y herramientas básicas que fuesen necesarias para cualquier eventualidad.

Para la estructura se consideró perfiles IPR como pilares, y correas G que sostienen la cubierta, las paredes son removibles para que en caso de ser necesario otorgarle al compresor

movilidad. Las medidas generales de la estación se pueden observar en la Figura, es necesario mencionar que la estructura se encuentra sobre una base de hormigón. En la Figura se puede observar el compresor dentro de la estación, y en la Figura se encuentra una vista general.

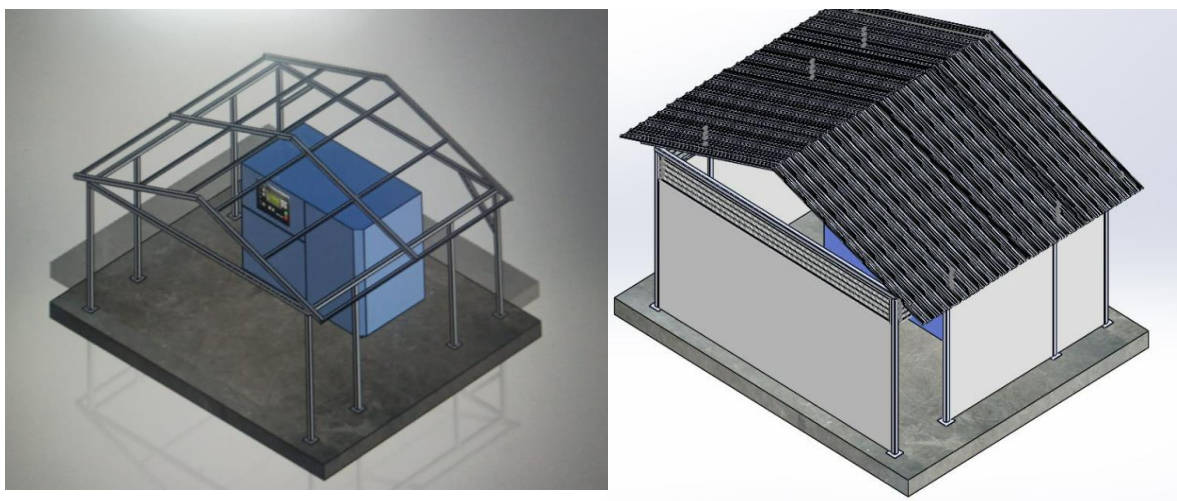
**Figura 17**

*Medidas generales, en milímetros, de la estación de compresión*



**Figura 16**

*Estructura de la estación de compresión*



### 3.4 Análisis de costos

Para realizar el análisis de costos, se tomó en consideración costos iniciales y costos operativos; el primero de ellos se refiere a los costos que se presentaron al inicio del proyecto, es decir, el valor de la tubería, de los equipos de comprensión, y de la construcción de las estaciones que albergaran dichos equipos; por otro lado los costos operativos, son aquellos que aparecen cuando el sistema de transporte se ha puesto en marcha, entre ellos se tiene: costos de electricidad, mantenimiento y gestión.

#### 3.4.1 Costos iniciales

Para describir los costos iniciales se decidió separarlos en tres partes. La Tabla 7 muestra el detalle de la primera de estas partes, que se refiere a los costos asociados a la construcción de la tubería, Es importante mencionar que los valores mostrados fueron obtenidos mediante cotizaciones de proveedores en línea, y el costo de soldadura, obra civil y mano de obra fue estimada mediante el 3%, 10%, y 25% del costo del valor más elevado, en este caso el de la tubería.

**Tabla 7**

*Costos asociados al sistema de tubería*

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Tubería de acero al carbono ASTM A106	45000	Unidades \$ 149,52	\$ 6.728.400,00
2	Codos 6"	392	Unidades \$ 27,00	\$ 10.584,00
3	Válvulas de compuerta 6"	57	Unidades \$ 400,00	\$ 22.800,00
4	Válvulas de Globo 6"	6	Unidades \$ 600,00	\$ 3.600,00
5	Soporte de tubería	45000	Unidades \$ 5,80	\$ 261.000,00
6	Soldadura	3% costo de tubería	\$ -	\$ 201.852,00
7	Obra Civil	10% costo de tubería	\$ -	\$ 672.840,00
8	Mano de obra	25% costo de tubería	\$ -	\$ 1.682.100,00
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 1182,32 \$ 9.583.176,00</b>

En la segunda parte de costos iniciales se consideró los valores de construcción de una estación de compresión, en la Tabla 8 se puede observar el detalle de los materiales necesarios, además de la obra civil y mano de obra que incrementan su valor debido al contexto donde se edifica la obra, considerando que es un lugar de difícil acceso.

**Tabla 8**

*Costo de construcción de una estación de compresión*

ítem	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Perfiles IPR (4X4)	4 Unidades	\$ 20,00	\$ 80,00
2	Correas 60*30*10*2	3 Unidades	\$ 18,00	\$ 54,00
3	Duratecho 6*0,89	4 Unidades	\$ 22,00	\$ 88,00
4	Persianas	4 m <sup>2</sup>	\$ 20,00	\$ 80,00
5	Tablero eléctrico	1 Unidad	\$ 100,00	\$ 100,00
6	Riel eléctrico	2 Unidades	\$ 2,00	\$ 4,00
7	Chapa	1 Unidad	\$ 30,00	\$ 30,00
8	Varilla	1 q	\$ 50,00	\$ 50,00
9	Cemento	3 sacos	\$ 8,50	\$ 25,50
10	Ripio	2 metros	\$ 5,00	\$ 10,00
11	Soldadura	3 kilo	\$ 4,90	\$ 14,70
12	Obra Civil	10% Costo Tubería	\$	\$ 6500,00
13	Mano de obra	1 -	\$ 110,20	\$ 4000,00
14	Diseño (Planos)	2 -	\$ 80,00	\$ 160,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 280,40</b>	<b>\$11.196,20</b>

La última parte de los costos iniciales fue el costo de los compresores, los mismos que se detallan en la Tabla 9, y es necesario mencionar que tales valores fueron extraídos de proveedores en línea. Es necesario mencionar que los costos de cada compresor difieren entre sí, porque la potencia de cada equipo es diferente. En adición se ha considerado valores de impuestos y transporte como el 20% del costo de compresores.

**Tabla 9***Costo de compresores*

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>		<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
<b>1</b>	Compresor	1	Unidad	\$ 24.600,00	\$ 24.600,00
<b>2</b>	Compresor	1	Unidad	\$ 9.000,00	\$ 9.000,00
<b>3</b>	Compresor	1	Unidad	\$ 4.400,00	\$ 4.400,00
<b>4</b>	Impuestos + Flete	30% compresores		-	\$ 11.400,00
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 38.000,00</b>	<b>\$ 49.400,00</b>

Finalmente, la Tabla 10 muestra un resumen de los valores iniciales considerados para este proyecto, es decir: Costo de tuberías, costo de construcción y costo de equipos de compresión. Obteniéndose un valor final que posteriormente se consideró como el capital inicial considerado para este proyecto.

**Tabla 10***Sumatoria total de costos iniciales*

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
<b>1</b>	Costos de tuberías	\$ 9.583.176,00
<b>2</b>	Costos de Construcción	\$ 33.588,60
<b>3</b>	Costos de Compresores	\$ 49.400,00
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 9.666.164,60</b>

**3.4.2 Costos Operativos**

Los costos operativos se refieren a aquellos valores que son generados de manera mensual y que deben ser cancelados para mantener operativo el sistema de transporte. La tabla 11 muestra los valores generados por el uso de electricidad, considerando que el costo del kilovatio – hora, es 9.2 centavos de dólar.

Para dar una explicación más detallada de los valores mostrados en la tabla 11, a continuación, se realiza un cálculo ejemplo del costo eléctrico total de uno de los compresores. Considerando que un año tiene 8760 horas, además que el costo de iluminación y de mantenimiento es el 5% y 3% respectivamente del costo de la electricidad de los tres compresores.

$$(199.8 \text{ kW})(8760 \text{ h}) = 1.750.248 \text{ kWh}$$

$$(1.750.248 \text{ kWh})(\$0.092) = \$ 161.022,816$$

**Tabla 11**

*Costos Operativos*

<b>Otros Costos</b>				
<b>Detalle</b>	<b>kW</b>	<b>KWh</b>	<b>Costo Eléctrico</b>	<b>Total</b>
<b>Compresor 1</b>	199,8	1750248	\$0,092	\$161.022,816
<b>Compresor 2</b>	82,17	719809,2	\$0,092	\$66.222,446
<b>Compresor 3</b>	50,85	445446	\$0,092	\$40.981,032
				\$268.226,294
<b>Iluminación y Óp. Adicional</b>			<b>5%</b>	\$13.411,315
<b>Subtotal</b>				\$281.637,609
<b>MANTENIMIE NTO, GESTIÓN Y REPARACION ES (C.R)</b>			<b>3%</b>	\$289.158,366
<b>TOTAL</b>				<b>\$570.795,975</b>

Finalmente se obtiene un valor de costos operativos igual a \$570.795,975; los mismos que se consideraron constantes a lo largo del periodo de funcionamiento del sistema.

En la Tabla 12 se encuentran los costos totales a lo largo del periodo considerado, para ello se tomó como valor capital, la sumatoria de los costos iniciales, es decir, aquellos

considerados en el año cero, para posteriormente desde el año uno hasta el veinte, tomar en consideración los costos operativos, que como se mencionó previamente es constante a lo largo de los periodos.

El factor de descuento es aquel que se usa para el cálculo del valor presente, en este caso se ha considerado un factor de descuento igual al 12%. Para obtenerse el costo de transporte para cada uno de los años tomados en consideración.

**Tabla 12**

*Gastos por periodos*

<b>Año</b>	<b>Capital</b>	<b>Costos operativos</b>	<b>Factor de descuento</b>	<b>Costo por cada periodo</b>
0	\$ 9.666.164,60		1,00	\$ 9.638.612,20
1		\$ 570.795,98	1,12	\$ 509.639,26
2	0	\$ 570.795,98	1,25	\$ 455.035,06
3	0	\$ 570.795,98	1,40	\$ 406.281,30
4	0	\$ 570.795,98	1,57	\$ 362.751,16
5	0	\$ 570.795,98	1,76	\$ 323.884,97
6	0	\$ 570.795,98	1,97	\$ 289.183,00
7	0	\$ 570.795,98	2,21	\$ 258.199,11
8	0	\$ 570.795,98	2,48	\$ 230.534,92
9	0	\$ 570.795,98	2,77	\$ 205.834,75
10	0	\$ 570.795,98	3,11	\$ 183.781,03
11	0	\$ 570.795,98	3,48	\$ 164.090,20
12	0	\$ 570.795,98	3,90	\$ 146.509,11
13	0	\$ 570.795,98	4,36	\$ 130.811,71
14	0	\$ 570.795,98	4,89	\$ 116.796,17
15	0	\$ 570.795,98	5,47	\$ 104.282,29
16	0	\$ 570.795,98	6,13	\$ 93.109,19
17	0	\$ 570.795,98	6,87	\$ 83.133,20
18	0	\$ 570.795,98	7,69	\$ 74.226,07
19	0	\$ 570.795,98	8,61	\$ 66.273,28
20	0	\$ 570.795,98	9,65	\$ 59.172,57

Finalmente, la Tabla 13 muestra el valor del costo de transportar  $CO_2$  capturado desde Pichincha hasta Shushufindi. Para ello se consideraron los costos totales, mostrados previamente,



además de la energía que genera la planta, que en este caso es de 20kW, valor que fue multiplicado por las horas que tiene un año, y posteriormente llevarlo a 20 años, para finalmente obtener una relación entre la generación de energía y el costo de transportar el  $CO_2$ , que finalmente resultó ser 0.003975; valor que se considera bajo, por lo tanto, la realización del proyecto es económicamente viable.

**Tabla 13**

*Costos de transporte del dióxido de carbono*

		kW*h (1año)	kW*h (20años)
Costos Totales	\$ 13.929.692,96		
Energía de la Planta	20000	175200000	3504000000
<b>Costo del Transporte <math>CO_2</math></b>			<b>\$ 0,003975</b>

## **CAPÍTULO 4**

## 4.1 Conclusiones

- La simulación detallada y el análisis exhaustivo del sistema de transporte de  $CO_2$  en estado supercrítico han arrojado resultados de gran relevancia y profundidad. La alternativa de solución elegida, que involucra el uso de tuberías con aislante térmico para el transporte de  $CO_2$  capturado desde Pichincha hasta Shushufindi, se ha mostrado como la opción más viable y ventajosa en función de una serie de factores clave.
- La implementación de un sistema de tuberías con aislante térmico ha demostrado ser una decisión acertada desde diferentes perspectivas. Uno de los aspectos más destacados es la eficiencia energética que esta opción conlleva. Al reducir significativamente las pérdidas de calor durante el transporte, se asegura que el  $CO_2$  mantenga sus condiciones supercríticas a lo largo de todo el trayecto. Esto, a su vez, garantiza un control preciso en cada estación de bombeo y evita fluctuaciones no deseadas en temperatura y presión. Además, esta eficiencia energética se traduce en un ahorro sustancial tanto en términos de consumo de energía como en costos operativos a lo largo del tiempo.
- La seguridad es otro aspecto fundamental que respalda la elección del aislante térmico en las tuberías. Al mantener las condiciones estables y prevenir cambios bruscos en la temperatura y presión del  $CO_2$ , se minimiza el riesgo de condensación, crecimiento microbiano y otros daños asociados a la humedad.
- La comparación entre la alternativa con aislante térmico y la opción sin aislante térmico, respaldada por un análisis detallado y una matriz de decisión, revela claramente las ventajas de la primera. Aunque la solución sin aislante puede

parecer más económica en términos iniciales, los posibles riesgos, las pérdidas de eficiencia y los costos operativos a largo plazo la hacen menos favorable en comparación con la opción con aislante térmico.

- La evaluación integral del proyecto se manifiesta bajo los aspectos de costos y producción de energía, extendiéndose hacia los gastos asociados al transporte de  $CO_2$ . Según el análisis, estos gastos están calculados en \$0.003975 por cada kWh generado. Al contrastar esta cifra con el precio de la electricidad en Ecuador, valorado en 9.2 centavos por kWh, el proyecto claramente demuestra su viabilidad económica y por ende el diseño de transporte óptimo a utilizar. Este análisis fortalece la relevancia de la planificación estratégica y el cumplimiento normativo en lo que concierne al transporte del  $CO_2$  supercrítico. La continua supervisión y la implementación gradual de mejoras asegurarán la eficiencia sostenible a largo plazo. La recopilación de los datos operativos respaldará las decisiones futuras y mantendrá el proyecto alineado con estándares planteados. Finalmente, la consideración de los costos de transporte en relación con el precio de la electricidad presenta al proyecto como una inversión sólida. Su enfoque proactivo y compromiso con la eficiencia son factores importantes para lograr el éxito y cumplir con cada uno de los objetivos planteados mismos que se encuentran relacionados a la generación de energía sostenible.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda llevar a cabo un análisis exhaustivo de las condiciones geográficas y topográficas a lo largo de la trayectoria del sistema de transporte. Esto permitirá identificar puntos estratégicos para ubicar las estaciones de bombeo y las

secciones de tuberías de manera eficiente. Al considerar factores como la elevación y el perfil del terreno, se puede maximizar la eficiencia del proceso y minimizar las pérdidas de energía, asegurando un flujo continuo y estable del  $CO_2$  en estado supercrítico.

- Se recomienda llevar a cabo estudios detallados sobre los materiales de aislante térmico más apropiados para las tuberías. Estos estudios deben evaluar no solo las propiedades de resistencia térmica, durabilidad y costo, sino también su impacto ambiental y su capacidad para mantener la integridad del estado supercrítico del  $CO_2$  a lo largo de la trayectoria. Explorar opciones innovadoras y sostenibles puede resultar en un aislamiento térmico eficiente y de larga duración.
- Es esencial establecer sistemas de monitoreo y control avanzados en cada estación de bombeo y punto clave a lo largo de la trayectoria. Esto permitirá un seguimiento en tiempo real de las condiciones de temperatura y presión del  $CO_2$ , facilitando la detección temprana de posibles desviaciones y permitiendo una respuesta rápida ante fluctuaciones. La inversión en tecnología de monitoreo y automatización garantiza una operación segura y confiable del sistema.
- Se recomienda implementar programas de capacitación y formación integral para el personal encargado de operar y mantener el sistema de transporte. Garantizar que el personal esté capacitado para manejar situaciones de emergencia, llevar a cabo mantenimiento preventivo y resolver problemas operativos de manera eficiente. La capacitación constante asegurará una operación segura y efectiva del sistema.

- Explorar la viabilidad de integrar tecnologías de recuperación de calor en las estaciones de bombeo y puntos estratégicos a lo largo de la trayectoria. Esto permitirá aprovechar el calor residual del proceso para aplicaciones secundarias, como calentamiento de agua o calefacción, contribuyendo así a una mayor eficiencia energética y a la reducción de costos operativos.
- Se recomienda fomentar la colaboración con instituciones académicas, centros de investigación y expertos en el transporte de sustancias supercríticas. Participar en proyectos de investigación conjunta y compartir conocimientos puede abrir oportunidades para la mejora continua del diseño y la identificación de soluciones innovadoras que optimicen la eficiencia y seguridad del sistema.
- Mantener una comunicación constante con las autoridades regulatorias y cumplir con todas las normativas aplicables al transporte de sustancias supercríticas. Se debe establecer un plan de seguimiento a largo plazo para evaluar continuamente el desempeño del sistema de transporte y realizar mejoras incrementales. Mantener registros detallados de datos operativos y resultados de simulaciones respaldará futuras decisiones de diseño y optimización, garantizando la conformidad con estándares actualizados y la eficiencia sostenible a lo largo del tiempo

## REFERENCIAS

- Ansarizadeh, M., Dodds, K., Gurpinar, O., Pekot, L., Kalfa, Ü., Sahin, S., Uysal, S., Ramakrishnan, T., Sacuta, N., & Whittaker, S. (2015). Carbon dioxide-challenges and opportunities. *Oilfield Review*, 27(2), 36–50.
- BBC New Services. (2014). *UN dilemma over “Cinderella” technology* - *BBC News*.  
<https://www.bbc.com/news/science-environment-26994746>
- Calvo, L. (2017). Extracción mediante CO<sub>2</sub> supercrítico. *Universidad Complutense de Madrid*.  
<https://www.ucm.es/otri/complutransfer-extraccion-mediante-co2-supercritico>
- Candel, M. (2019). *El futuro de las tecnologías de biomasa con captura de CO<sub>2</sub> en la Unión Europea* [Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/handle/11441/93421>
- Chang, Raymond., & Goldsby, K. (2017). *Química* (P. Hernández, Ed.; 12th ed.). McGraw-Hill.  
<https://books.google.com/books/about/Qu%C3%ADmica.html?id=cjZQswEACAAJ>
- CIR Industria Metalúrgica. (2017). *Cisternas para transporte de diversos productos*. CIR.  
[https://www.ciruy.com/antecedente\\_cisterna\\_para\\_transporte\\_de\\_co2\\_472#prettyPhoto](https://www.ciruy.com/antecedente_cisterna_para_transporte_de_co2_472#prettyPhoto)
- EP Petroecuador. (2017). *Plan general de negocios, expansión e inversión 2018*.
- Espínola, F. (2020). *ASPEN PLUS Modelo termodinámico*.  
<https://www.youtube.com/watch?v=ljs7eMvYRiA>
- Espínola, F. (2021). *ASPEN PLUS Introducción*.  
<https://www.youtube.com/watch?v=R8y1mH7OfgA&t=239s>
- Gayán, P., & Pérez-Vega, R. (2019). Tecnologías de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>: Chemical Looping Combustion. *Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Minas de Aragón*, 35–39.  
<https://digital.csic.es/handle/10261/205951>

- Green Facts. (2022). *Captura y almacenamiento de CO2*: <https://www.greenfacts.org/es/captura-almacenamiento-co2/1-2/1-secuestro-carbono.htm#1>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability — IPCC*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>
- Meddveczky, D. E., & Ochoa, J. E. (2012). *Tendencia del factor de emisiones de Co2 del sector eléctrico ecuatoriano basado en la metodología de la convención macro de las naciones unidas sobre el cambio climático* [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/686>
- Mejía, C. (2022). *Relación de las emisiones de gases de efecto invernadero con la temperatura en Ecuador* [Escuela Superior Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López]. <https://repositorio.esпам.edu.ec/handle/42000/1770>
- Molina, C. (2018). *La influencia del CO2 en la temperatura*. <https://www.bing.com/search?q=La+influencia+del+CO2+en+la+temperatura+molina+2018&form=ANNTTH1&refig=1818632956d2423f8c29ed1f9affb321>
- Nación Wampis. (2018). *Pobladores de Fernando Rosas toman la Estación N°4 del Oleoducto Nor - Peruano en protesta por filtraciones de crudo*. <https://nacionwampis.com/pobladores-de-fernando-rosas-toman-la-estacion-n4-del-oleoducto-nor-peruano-en-protesta-por-derrames-de-crudo/>
- National Geographic. (2012). *Reciclando el Carbono: Extrayendo Combustible del Aire* | National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/reciclando-el-carbono-extrayendo-combustible-del-aire>



- Organización de las Naciones Unidas. (2017). *¡Empieza con estas diez acciones! | Naciones Unidas*. United Nations. <https://www.un.org/es/actnow/ten-actions>
- Proveedora de Suministros Industriales. (2016). *Anexo 7: Tubería acero al carbón ASTM A53 Normas de Fabricación*.
- Sotelo, J., & Ovejero, G. (2003). Procesos con fluidos supercríticos. *Anales de La Real Sociedad Española de Química*, 4, 15–23.  
[https://www.researchgate.net/publication/28208810\\_Procesos\\_con\\_fluidos\\_supercriticos](https://www.researchgate.net/publication/28208810_Procesos_con_fluidos_supercriticos)
- Tipler, P., & Mosca, G. (2010). *Física para la ciencia y la tecnología 6ª ed. (Física Moderna) (6ª)*. Editorial Reverte S.A. <http://www.reverte.com/isbn/9788429144260>
- Villanueva, Á. (2010). Métodos termodinámicos en simuladores de procesos. *Universidad de Sevilla*.

## APÉNDICE A

### DIVISIÓN DEL POLIDUCTO SHUSHUFINDI – QUITO EN 278 SEGMENTOS DE ANÁLISIS

En la Tabla 14 se muestra la posición geográfica, longitud y altura topográfica de cada uno de los 278 puntos en los que fue dividido el poliducto Shushufindi – Quito para su estudio. Los resultados fueron obtenidos a partir de los registros técnicos proporcionados por EP Petroecuador (2018).

**Tabla 14**

División del poliducto Shushufindi – Quito en 278 subtramos

Tramo	Subtramo	Posición	Longitud (km)	Altura (msnm)
<b>SHUSH UFINDI - QUIJO S</b>	PK 000	S0 11.878 W76 39.027	0	264
	PK 001	S0 11.505 W76 39.405	1	265
	PK 002	S0 11.084 W76 39.736	2	258
	PK 003	S0 10.881 W76 40.205	3	278
	PK 004	S0 10.756 W76 40.644	4	279
	PK 005	S0 11.033 W76 41.044	5	267
	PK 006	S0 11.121 W76 41.570	6	261
	PK 007	S0 11.162 W76 42.098	7	266
	PK 008	S0 11.091 W76 42.606	8	264
	PK 009	S0 11.180 W76 43.101	9	266
	PK 010	S0 11.132 W76 43.649	10	267
	PK 011	S0 11.174 W76 44.161	11	266
	PK 012	S0 11.183 W76 44.691	12	267
	PK 013	S0 11.143 W76 45.217	13	271
	PK 014	S0 11.270 W76 45.732	14	273
	PK 015	S0 11.167 W76 46.260	15	279
	PK 016	S0 11.139 W76 46.795	16	278
PK 017	S0 11.059 W76 47.318	17	281	

PK 018	S0 10.878 W76 47.815	18	282
PK 019	S0 10.786 W76 48.321	19	276
PK 020	S0 10.617 W76 48.842	20	284
PK 021	S0 10.465 W76 49.353	21	281
PK 022	S0 10.569 W76 49.874	22	280
PK 023	S0 10.602 W76 50.308	23	280
PK 024	S0 10.203 W76 50.675	24	282
PK 025	S0 09.809 W76 51.045	25	284
PK 026	S0 09.311 W76 51.239	26	284
PK 027	S0 08.813 W76 51.261	27	285
PK 028	S0 08.311 W76 51.157	28	287

(EP Petroecuador 2018)

División del poliducto Shushufindi – Quito en 279 subtramos (Continuación)

Tramo	Subtramo	Posición	Longitud (km)	Altura (msnm)
<b>SHUSH UFINDI - QUIJO S</b>	PK 029	S0 07.827 W76 51.398	29	290
	PK 030	S0 07.350 W76 51.654	30	293
	PK 031	S0 06.872 W76 51.907	31	293
	PK 032	S0 06.400 W76 52.178	32	298
	PK 033	S0 05.880 W76 52.155	33	291
	PK 034	S0 05.481 W76 52.345	34	299
	PK 035	S0 05.091 W76 52.550	35	301
	PK 036	S0 04.560 W76 52.643	36	299
	PK 037	S0 04.014 W76 52.731	37	294
	PK 038	S0 03.509 W76 52.827	38	303
	PK 039	S0 02.985 W76 52.939	39	309
	PK 040	S0 02.466 W76 53.060	40	300
	PK 041	S0 01.940 W76 53.124	41	302
	PK 042	S0 01.405 W76 53.182	42	316
	PK 043	S0 00.874 W76 53.212	43	319
	PK 044	S0 00.342 W76 53.205	44	302

PK 045	N0 00.183 W76 53.164	45	308
PK 046	N0 00.717 W76 53.125	46	313
PK 047	N0 01.255 W76 53.101	47	301
PK 048	N0 01.791 W76 53.057	48	300
PK 049	N0 02.322 W76 53.003	49	298
PK 050	N0 02.813 W76 53.038	50	298
PK 051	N0 03.056 W76 53.577	51	293
PK 052	N0 03.510 W76 53.691	52	294
PK 053	N0 04.013 W76 53.595	53	289
PK 054	N0 04.506 W76 53.548	54	294
PK 055	N0 04.933 W76 53.882	55	297
PK 056	N0 05.069 W76 54.355	56	300
PK 057	N0 05.064 W76 54.899	57	299
PK 058	N0 04.893 W76 55.401	58	308
PK 059	N0 04.707 W76 55.891	59	303
PK 060	N0 04.817 W76 56.438	60	307
PK 061	N0 05.045 W76 56.884	61	307
PK 062	N0 05.065 W76 57.407	62	309
PK 063	N0 05.064 W76 57.944	63	311
PK 064	N0 05.052 W76 58.485	64	312
PK 065	N0 05.079 W76 59.006	65	313
PK 066	N0 04.970 W76 59.572	66	307
PK 067	N0 04.858 W77 00.036	67	317
PK 068	N0 04.959 W77 00.566	68	314

(EP Petroecuador 2018)

División del poliducto Shushufindi – Quito en 279 subtramos (Continuación...)

Tramo	Subtramo	Posición	Longitud (km)	Altura (msnm)
	PK 069	N0 04.965 W77 01.088	69	320
	PK 070	N0 04.969 W77 01.625	70	326

**SHUSH  
UFINDI  
-  
QUIJO  
S**

PK 071	N0 04.972 W77 02.145	71	319
PK 072	N0 05.002 W77 02.674	72	323
PK 073	N0 05.024 W77 03.210	73	328
PK 074	N0 05.041 W77 03.716	74	329
PK 075	N0 05.059 W77 04.287	75	332
PK 076	N0 05.077 W77 04.822	76	347
PK 077	N0 05.073 W77 05.358	77	340
PK 078	N0 05.097 W77 05.875	78	341
PK 079	N0 05.101 W77 06.415	79	367
PK 080	N0 05.103 W77 06.949	80	350
PK 081	N0 05.103 W77 07.489	81	357
PK 082	N0 05.105 W77 08.028	82	361
PK 083	N0 05.098 W77 08.566	83	363
PK 084	N0 05.049 W77 09.086	84	361
PK 085	N0 05.238 W77 09.572	85	367
PK 086	N0 05.198 W77 10.064	86	365
PK 087	N0 05.174 W77 10.602	87	368
PK 088	N0 05.133 W77 11.140	88	373
PK 089	N0 05.095 W77 11.667	89	370
PK 090	N0 04.927 W77 12.157	90	365
PK 091	N0 04.764 W77 12.651	91	394
PK 092	N0 04.616 W77 13.178	92	400
PK 093	N0 04.452 W77 13.691	93	395
PK 094	N0 04.373 W77 14.192	94	382
PK 095	N0 04.399 W77 14.744	95	407
PK 096	N0 04.558 W77 15.204	96	466
PK 097	N0 04.712 W77 15.713	97	411
PK 098	N0 04.740 W77 16.202	98	433
PK 099	N0 05.099 W77 16.561	99	453
PK 100	N0 04.763 W77 16.852	100	424
PK 101	N0 04.371 W77 17.180	101	447
PK 102	N0 03.913 W77 17.400	102	480
PK 103	N0 03.496 W77 17.719	103	457
PK 104	N0 03.171 W77 18.082	104	512
PK 105	N0 03.096 W77 18.596	105	466
PK 106	N0 03.046 W77 19.135	106	478

PK 107	N0 02.876 W77 19.630	107	490
PK 108	N0 02.587 W77 20.084	108	504

(EP Petroecuador 2018)

**Tabla AIII.1.** División del poliducto Shushufindi – Quito en 279 subtramos

Tramo	Subtramo	Posición	Longitud (km)	Altura (msnm)
<b>SHUSH UFINDI - QUIJO S</b>	PK 109	N0 02.298 W77 20.541	109	519
	PK 110	N0 02.022 W77 21.007	110	530
	PK 111	N0 01.753 W77 21.424	111	530
	PK 112	N0 01.467 W77 21.884	112	544
	PK 113	N0 01.191 W77 22.346	113	557
	PK 114	N0 00.907 W77 22.803	114	576
	PK 115	N0 00.579 W77 23.231	115	606
	PK 116	N0 00.186 W77 23.579	116	631
	PK 117	S0 00.065 W77 24.046	117	662
	PK 118	S0 00.295 W77 24.511	118	726
	PK 119	S0 00.533 W77 24.977	119	791
	PK 120	S0 00.866 W77 25.356	120	879
	PK 121	S0 01.007 W77 25.812	121	938
<b>QUIJO S - OSAYA CU</b>	PK 121	S0 01.095 W77 26.141	122	987
	PK 122	S0 01.099 W77 26.182	122	1 005
	PK 123	S0 01.310 W77 26.565	123	1 056
	PK 124	S0 01.248 W77 27.083	124	1 135
	PK 125	S0 00.887 W77 27.444	125	1 153
	PK 126	S0 00.601 W77 27.830	126	1 143
	PK 127	S0 00.553 W77 28.351	127	1 176
	PK 128	S0 00.557 W77 28.754	128	1 210
	PK 129	S0 00.604 W77 29.374	129	1 257
	PK 130	S0 00.785 W77 29.851	130	1 330
	PK 131	S0 01.126 W77 30.173	131	1 401
	PK 132	S0 01.402 W77 30.607	132	1 471
	PK 133	S0 01.831 W77 30.870	133	1 394
	PK 134	S0 02.200 W77 31.248	134	1 344
	PK 135	S0 02.652 W77 31.474	135	1 420
	PK 136	S0 02.751 W77 31.906	136	1 416

PK 137	S0 02.759 W77 32.400	137	1 454
PK 138	S0 03.009 W77 32.809	138	1 499
PK 139	S0 03.188 W77 33.280	139	1 530
PK 140	S0 03.494 W77 33.696	140	1 555
PK 141	S0 03.764 W77 34.087	141	1 600
PK 142	S0 04.122 W77 34.462	142	1 662
PK 143	S0 04.475 W77 34.847	143	1 650
PK 144	S0 04.715 W77 35.302	144	1 643
PK 145	S0 05.054 W77 35.149	145	1 655
PK 146	S0 05.433 W77 35.062	146	1 612
PK 147	S0 05.623 W77 35.474	147	1 567

(EP Petroecuador 2018)

División del poliducto Shushufindi – Quito en 279 subtramos (Continuación...)

Tramo	Subtramo	Posición	Longitud (km)	Altura (msnm)
<b>QUIJO S - OSAYA CU</b>	PK 148	S0 05.988 W77 35.595	148	1 489
	PK 149	S0 06.371 W77 35.429	149	1 267
	PK 150	S0 06.598 W77 35.758	150	1 259
	PK 151	S0 07.052 W77 35.921	151	1 222
	PK 152	S0 07.475 W77 36.161	152	1 223
	PK 153	S0 07.883 W77 36.527	153	1 356
	PK 154	S0 08.135 W77 36.970	154	1 281
	PK 155	S0 08.451 W77 37.389	155	1 263
	PK 156	S0 08.580 W77 37.885	156	1 265
	PK 157	S0 09.008 W77 38.103	157	1 253
	PK 158	S0 09.231 W77 38.574	158	1 273
	PK 159	S0 09.545 W77 39.008	159	1 292
	PK 160	S0 09.741 W77 39.461	160	1 273
	PK 161	S0 09.848 W77 39.959	161	1 302
	PK 162	S0 10.125 W77 40.125	162	1 294
	PK 163	S0 10.536 W77 40.749	163	1 281
	PK 164	S0 10.959 W77 41.099	164	1 282
	PK 165	S0 11.388 W77 41.376	165	1 295
	PK 166	S0 11.870 W77 41.388	166	1 287

PK 167	S0 10.163 W77 40.365	167	1 288
PK 168	S0 12.144 W77 41.899	168	1 308
PK 169	S0 11.980 W77 42.235	169	1 326
PK 170	S0 11.586 W77 42.537	170	1 372
PK 171	S0 11.595 W77 42.986	171	1 442
PK 172	S0 11.918 W77 43.361	172	1 406
PK 173	S0 12.390 W77 43.478	173	1 522
PK 174	S0 12.751 W77 43.824	174	1 558
PK 175	S0 13.208 W77 43.995	175	1 730
PK 176	S0 13.702 W77 44.106	176	1 648
PK 177	S0 14.224 W77 44.053	177	1 709
PK 178	S0 14.698 W77 44.201	178	1 783
PK 179	S0 15.156 W77 44.482	179	1 860
PK 180	S0 15.488 W77 44.886	180	1 841
PK 181	S0 15.865 W77 45.244	181	1 853
PK 182	S0 16.193 W77 45.595	182	1 860
PK 183	S0 16.637 W77 45.872	183	1 863
PK 184	S0 17.046 W77 46.165	184	1 742
PK 185	S0 17.286 W77 46.598	185	1 626
PK 186	S0 17.703 W77 46.884	186	1 536
PK 187	S0 18.183 W77 47.190	187	1 512

(EP Petroecuador 2018)

División del poliducto Shushufindi – Quito en 279 subtramos

Tramo	Subtramo	Posición	Longitud (km)	Altura (msnm)
<b>QUIJO S - OSAYA CU</b>	PK 188	S0 18.670 W77 47.186	188	1 508
	PK 189	S0 19.091 W77 47.480	189	1 501
	PK 190	S0 19.499 W77 47.672	190	1 494
	PK 191	S0 19.795 W77 48.103	191	1 544
	PK 192	S0 20.120 W77 48.507	192	1 575
	PK 193	S0 20.498 W77 48.879	193	1 603
	PK 194	S0 20.957 W77 49.120	194	1 603
	PK 195	S0 21.517 W77 49.079	195	1 589
	PK 196	S0 22.030 W77 49.183	196	1 577
	PK 197	S0 22.439 W77 49.425	197	1 664
	PK 198	S0 22.812 W77 49.744	198	1 649
	PK 199	S0 23.264 W77 50.044	199	1 660



	PK 200	S0 23.729 W77 50.228	200	1 819
	PK 201	S0 24.243 W77 50.319	201	1 685
	PK 202	S0 24.740 W77 50.472	202	1 719
	PK 203	S0 25.214 W77 50.700	203	1 744
	PK 204	S0 25.629 W77 51.046	204	1 758
	PK 205	S0 26.072 W77 51.338	205	1 812
	PK 206	S0 26.356 W77 51.792	206	1 827
	PK 207	S0 26.706 W77 52.200	207	1 851
<b>OSAYA CU - CHALP I</b>	PK 207	S0 26.932 W77 52.354	208	1 856
	PK 208	S0 26.987 W77 52.613	208	1 870
	PK 209	S0 27.049 W77 53.131	209	1 886
	PK 210	S0 27.316 W77 53.501	210	1 800
	PK 211	S0 27.597 W77 53.834	211	1 804
	PK 212	S0 27.703 W77 54.302	212	1 840
	PK 213	S0 27.913 W77 54.738	213	1 851
	PK 214	S0 27.709 W77 55.163	214	1 887
	PK 215	S0 27.726 W77 55.644	215	1 902
	PK 216	S0 27.395 W77 56.087	216	1 937
	PK 217	S0 27.199 W77 56.518	217	1 951
	PK 218	S0 26.990 W77 56.961	218	1 966
	PK 219	S0 26.649 W77 57.407	219	1 999
	PK 220	S0 26.280 W77 57.602	220	2 026
	PK 221	S0 26.256 W77 58.013	221	2 056
	PK 222	S0 25.895 W77 58.192	222	2 192
	PK 223	S0 25.693 W77 58.467	223	2 117
	PK 224	S0 25.788 W77 58.894	224	2 141
	PK 225	S0 25.706 W77 59.387	225	2 250
PK 226	S0 25.698 W77 59.893	226	2 330	

(EP Petroecuador 2018)

División del poliducto Shushufindi – Quito en 279 subtramos (Continuación...)

Tramo	Subtramo	Posición	Longitud (km)	Altura (msnm)
<b>OSAYA CU -</b>	PK 227	S0 25.564 W78 00.363	227	2 370
	PK 229	S0 25.026 W78 01.138	229	2 351
	PK 230	S0 24.906 W78 01.627	230	2 408
	PK 231	S0 24.768 W78 02.114	231	2 429
	PK 232	S0 24.552 W78 02.581	232	2 471

<b>CHALP I</b>	PK 233	S0 24.143 W78 02.837	233	2 524
	PK 234	S0 23.749 W78 03.162	234	2 562
	PK 235	S0 23.459 W78 03.558	235	2 596
	PK 236	S0 23.132 W78 03.838	236	2 655
	PK 237	S0 22.904 W78 04.335	237	2 688
	PK 238	S0 22.491 W78 04.607	238	2 724
	PK 239	S0 22.117 W78 04.984	239	2 773
	PK 240	S0 22.055 W78 05.488	240	2 821
	PK 241	S0 22.184 W78 06.009	241	2 845
	PK 242	S0 22.188 W78 06.526	242	2 894
<b>CHALP I - LA VIRGE N</b>	PK 242	S0 22.219 W78 06.591	242	2 886
	PK 243	S0 22.457 W78 07.137	243	2 928
	PK 244	S0 22.699 W78 07.590	244	3 013
	PK 245	S0 22.912 W78 07.926	245	3 013
	PK 246	S0 22.928 W78 08.432	246	2 994
	PK 247	S0 22.903 W78 08.903	247	3 291
	PK 248	S0 22.675 W78 09.363	248	3 391
	PK 249	S0 22.478 W78 09.850	249	3 409
	PK 250	S0 22.415 W78 10.380	250	3 412
	PK 251	S0 22.325 W78 10.896	251	3 585
	PK 252	S0 22.062 W78 11.323	252	3 715
	PK 253	S0 21.567 W78 11.464	253	3 818
	PK 254	S0 21.052 W78 11.614	254	3 918
	PK 255	S0 20.718 W78 11.983	255	3 918
	PK 256	S0 20.296 W78 12.168	256	4 036
PK 256	S0 19.988 W78 12.152	257	4 041	
<b>LA VIRGE N - OYAM BARO</b>	PK 257	S0 19.903 W78 12.344	257	4 050
	PK 258	S0 19.484 W78 12.581	258	3 998
	PK 259	S0 19.164 W78 12.989	259	3 925
	PK 260	S0 18.906 W78 13.446	260	3 790
	PK 261	S0 18.551 W78 13.791	261	3 770
	PK 262	S0 18.168 W78 14.134	262	3 768
	PK 263	S0 17.869 W78 14.579	263	3 729
	PK 264	S0 17.409 W78 14.844	264	3 737
	PK 265	S0 16.974 W78 15.153	265	3 610

(EP Petroecuador 2018)

División del poliducto Shushufindi – Quito en 279 subtramos (Continuación...)

Tramo	Subtramo	Posición	Longitud (km)	Altura (msnm)
<b>LA VIRGE N - OYAM BARO</b>	PK 266	S0 16.705 W78 15.652	266	3 471
	PK 267	S0 16.700 W78 16.101	267	3 687
	PK 268	S0 16.918 W78 16.574	268	3 708
	PK 269	S0 17.196 W78 17.037	269	3 585
	PK 270	S0 17.501 W78 17.463	270	3 473
	PK 271	S0 17.717 W78 17.957	271	3 317
	PK 272	S0 17.794 W78 18.460	272	3 198
	PK 273	S0 17.879 W78 18.967	273	3 084
	PK 274	S0 17.696 W78 19.419	274	2 832
	PK 275	S0 17.978 W78 19.691	275	2 902
	PK 276	S0 18.125 W78 20.178	276	2 876
	PK 277	S0 18.191 W78 20.692	277	2 838
	PK 278	S0 18.096 W78 21.561	278	2 674

(EP Petroecuador 2018)

# APÉNDICE B

## Normas y códigos para el diseño de la estación de compresión

Las normas, códigos y especificaciones que se soliciten tendrán la última revisión vigente. A continuación se listan las normas que deberán aplicarse para el diseño y construcción de la estación.

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for testing of Materials</i>
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>

**Tabla 1. Generales**

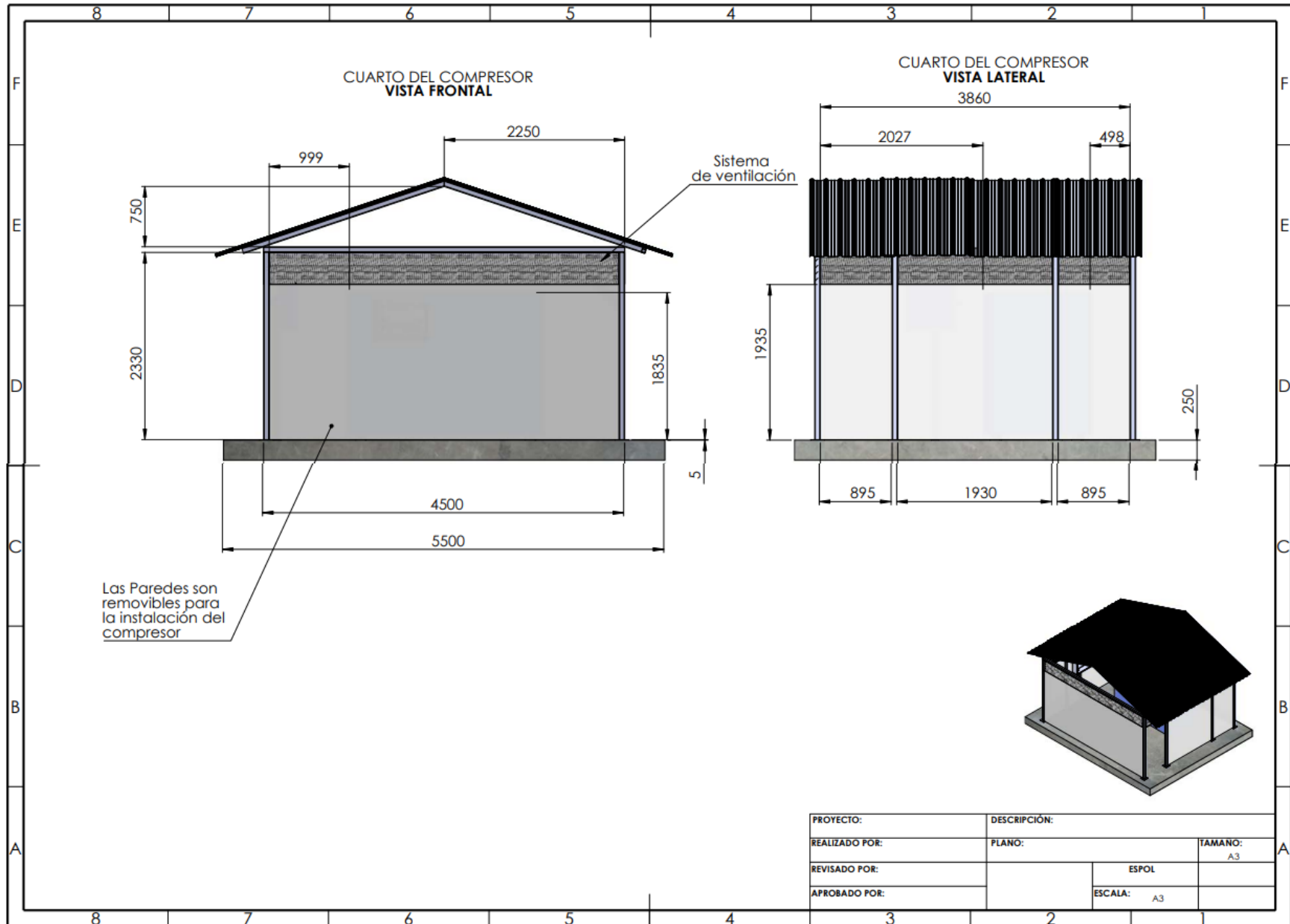
ASME B31.8	<i>Gas Transmission and Distribution Piping System</i>
API RP 520	<i>Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving devices in Refineries</i>
API RP 521	<i>Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems</i>
API STD 537	<i>Flare Details for General Refinery and Petrochemical Service</i> <i>API Spec 12J Specification for Oil and Gas separator</i>
ANSI/ISA-5.1	<i>Instrumentation Symbols and Identification.</i>
GPSA	<i>Engineering Data Book. Gas Processors Suppliers Association.</i>
API STD 617	<i>Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services.</i>

**Tabla 2. Procesos**

# APÉNDICE C

## Plano 1

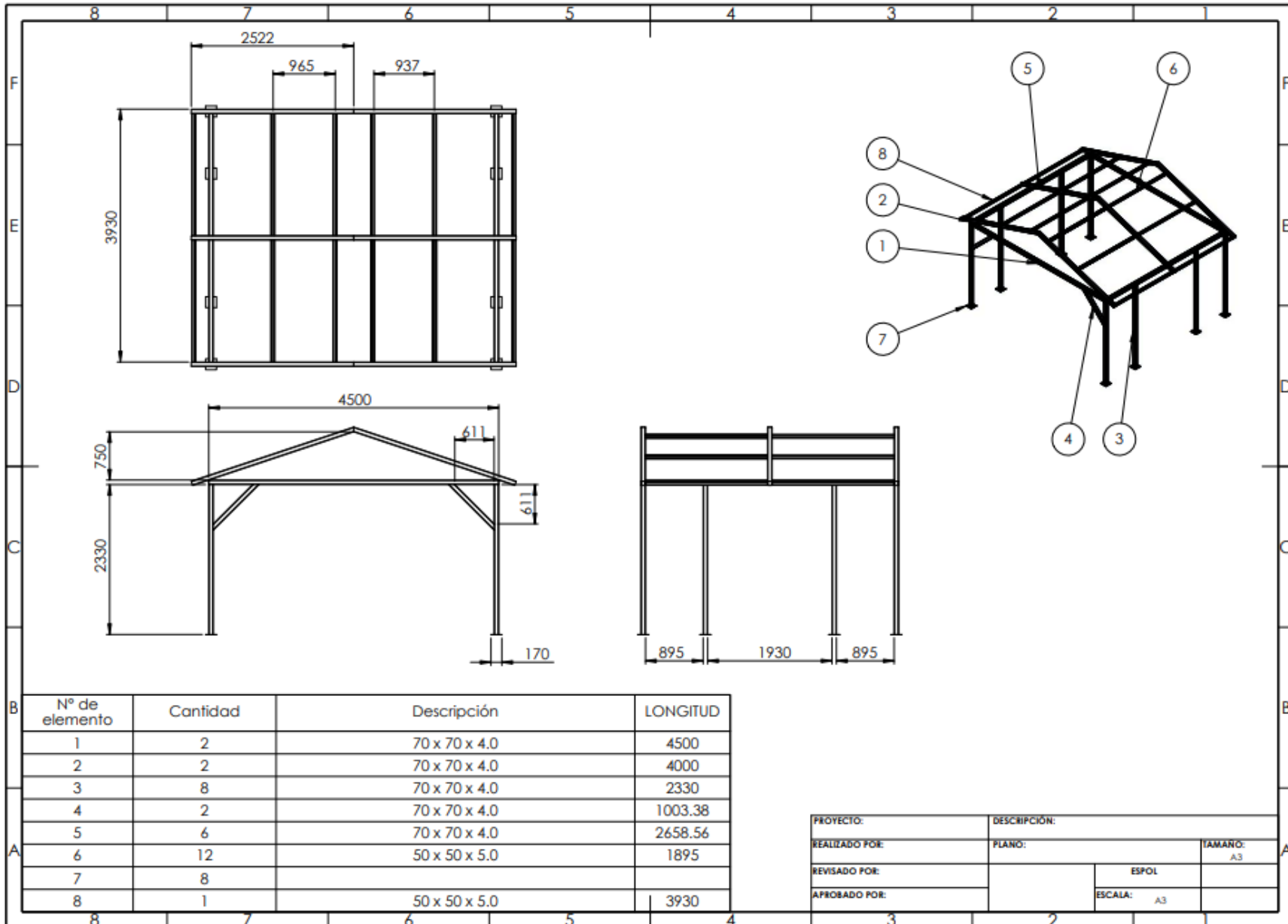
Medidas generales de una estación de compresión



PROYECTO:	DESCRIPCIÓN:		
REALIZADO POR:	PLANO:	TAMANO: A3	
REVISADO POR:		ESPOL	
APROBADO POR:		ESCALA:	A3

## Plano 2

Estructura que sostiene la estación de compresión



### Plano 3

Esquemático del sistema de transporte

# ESQUEMÁTICO SISTEMA DE TRANSPORTE

