UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA

VICERRECTORADO

CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL TRANSPORTE POR DUCTOS DE GAS NATURAL Y DIÓXIDO DE CARBONO

ELIZABETH VARGAS CÁCERES

Sucre - Bolivia

2024

CESIÓN DE DERECHOS

Al presentar este trabajo como requisito previo a la obtención del Diplomado en Transporte, Almacenamiento y Distribución de Hidrocarburos de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, autorizo al Centro de Estudios de Posgrado e Investigación o a la Biblioteca de la Universidad, para que se haga de este trabajo un documento disponible para su lectura, según normas de la Universidad.

También cedo a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, los derechos de publicación de este trabajo o parte de él, manteniendo mis derechos de autor hasta un periodo de 30 meses posterior a su aprobación.

Elizabeth Vargas Cáceres

Sucre, febrero de 2024

DEDICATORIA

A mis padres Román, Lourdes y
hermanos por sus consejos, confianza y
apoyo constante e incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser mi guía en todo momento, dándome fuerza y guiándome a lo largo de mi investigación. Al Centro de Estudios de Postgrado e Investigación Carrera de Pedagogía de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, por ser la casa superior de estudios donde me formé para fortalecer mis conocimientos y al Ing. HMER por su orientación en la elaboración del presente trabajo.

RESUMEN

El transporte por tuberías también llamado transporte por ductos es un medio de transporte de gases y líquidos que se viene practicando desde varias décadas y que constituye una red o un sistema de transporte. El transporte de gas natural por ductos también denominado gasoductos, es el proceso más importante en la industria petrolera y se divide en transporte y distribución. El transporte de CO_2 por ductos también denominado ceoductos, trata de un sistema que transporta CO_2 después de su captura a un sitio de almacenamiento a través de ductos. En el presente trabajo se pretende analizar las similitudes y diferencias del transporte por ductos de gas natural y CO_2 como alternativa de reducción en la concentración de los gases de efecto invernadero de origen antropogénico, principales contribuyentes del cambio climático. El CO_2 es el principal gas de efecto invernadero antropogénico y contribuyente del cambio climático que surge principalmente de la quema de combustibles fósiles para la producción de energía que viene desde grandes fuentes industriales. Se efectuó la búsqueda bibliográfica mediante las palabras claves en buscadores académicos como: google scholar, scopus, elseiver y SciencieDirect que posteriormente fueron gestionadas en Mendeley. Los resultados de investigación establecen, que, para el transporte del gas natural, se debe extraer el mismo desde el subsuelo hasta superficie, mientras que el CO_2 es capturado desde los centros industriales, posteriormente son acondicionados o tratados para eliminar o disminuir la concentración de compuestos indeseables y cumplir con especificaciones técnicas de calidad para ser transportados. El tratamiento para el gas natural, consiste de tres procesos: endulzamiento, deshidratación y ajuste de su punto de rocío, mientras que el transporte de CO_2, comienza con el acondicionamiento y finaliza con la inyección para su almacenamiento, además, el diseño de gasoductos y ceoductos debe cumplir una serie de requisitos técnicos de transporte entre ellos los fisicoquímicos, condiciones de trazado y seguridad y medio ambiente. Finalmente, se ha evidenciado múltiples similitudes y diferencias que gobiernan el transporte de estos gases por ductos. En una primera instancia los ceoductos fueron diseñados en base al transporte por gasoductos, sin embargo, en la actualidad se vienen desarrollando investigaciones para comprender perfectamente el flujo de CO_2 por ductos y su influencia en la atmósfera.

ÍNDICE

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN 1

1.1. ANTECEDENTES 1

1.2. OBJETIVOS 2

1.2.1. Objetivo general 2

1.2.2. Objetivos Específicos 2

1.3. JUSTIFICACIÓN 3

1.4. METODOLOGÍA 4

CAPÍTULO II DESARROLLO 5

2.1. MARCO TEÓRICO 5

2.1.1. Marco Conceptual 5

2.1.1.1. Transporte del gas natural 5

2.1.1.1.1. Gas Natural 5

2.1.1.1.2. Cadena de valor del gas natural 5

2.1.1.1.3. Composición 6

2.1.1.1.4. Densidad 7

2.1.1.1.5. Gravedad Especifica 7

2.1.1.1.6. Viscosidad 8

2.1.1.1.7. Gases Ideales 11

2.1.1.1.8. Gases Reales 12

2.1.1.1.9. Mezcla de gases 12

2.1.1.1.10. Factor de compresibilidad Z 13

2.1.1.1.11. Numero de Reynolds 14

2.1.1.1.12. Ecuación de Colebrook White 14

2.1.1.1.13. Ecuación de Colebrook White modificada 15

2.1.1.1.14. Normativa aplicable al diseño y construcción de gasoductos 15

2.1.1.2. Transporte de CO_2 17

2.1.1.2.1. Dióxido de carbono 17

2.1.1.2.2. Usos y aplicaciones 18

2.1.1.2.3. Gases de efecto invernadero GEI 19

2.1.2. Marco Contextual 19

2.1.2.1. Consumo mundial de combustibles fósiles 20

2.1.2.2. Emisiones de CO2 per cápita mundial 21

2.2. INFORMACIÓN Y DATOS OBTENIDOS 22

2.2.1. Ecuación general del flujo de gases 22

2.2.2. Ecuación de Weymouth 22
2.2.3. Ecuación Panhadle A 23
2.2.4. Método Standing-Katz 24
2.2.5. Método de la Asociación de Gas Natural de California (CNGA) 24
2.2.6. Flujo de trabajo de un proyecto para transporte de CO_2. 26
2.2.7. Normativa aplicable al diseño y construcción de ceoductos 27
2.2.8. Selección del trazado 28
2.2.9. Riesgos y fallas asociados al transporte por ceoductos 29
2.2.10. Diferencias del diseño de un gasoducto y ceoducto. 33
2.3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN 35
CAPÍTULO III CONCLUSIONES 38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de transporte y distribución de gas natural por redes..... 1
Figura 2. Flujograma seguido para la elaboración de la presente monografía. 4
Figura 3. Cadena de valor del gas natural. 5
Figura 4. Viscosidad vs Temperatura. 10
Figura 5. Consumo mundial de combustibles fósiles-energía primaria. 20
Figura 6. Consumo mundial del gas natural, medido en TW-h..... 20
Figura 7. Emisiones de CO_2 per cápita, 2022 a nivel mundial. 21
Figura 8. Emisiones de CO_2 per cápita en Bolivia..... 21
Figura 9. Gráfica para calcular el factor de compresibilidad Z. 25
Figura 10. Diseño en las fases de un proyecto. 26
Figura 11. Diagrama de fases según composición y pureza de la corriente de CO_2. .. 31
Figura 12. Diagrama de fases de hidrato de CO_2. 31
Figura 13. Grafica esquemática de la zona de transición dúctil-frágil..... 32
Figura 14. Comparativa (CO_2-GN) de velocidades de despresurización y de propagación de las grietas..... 33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición típica del gas natural. 6
Tabla 2. Propiedades de los gases. 9
Tabla 3. Viscosidad de gases. 11
Tabla 4. Rugosidades de distintos materiales. 15
Tabla 5. Propiedades del CO_2. 17
Tabla 6. Composiciones de la corriente de fluido según método de captura de CO_2 ... 30
Tabla 7. Especificaciones técnicas de diseño. 34
Tabla 8. Diferencias principales entre CO_2 y gas natural. 35
Tabla 9. Condiciones adecuadas del transporte de CO2 y gas natural. 35

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

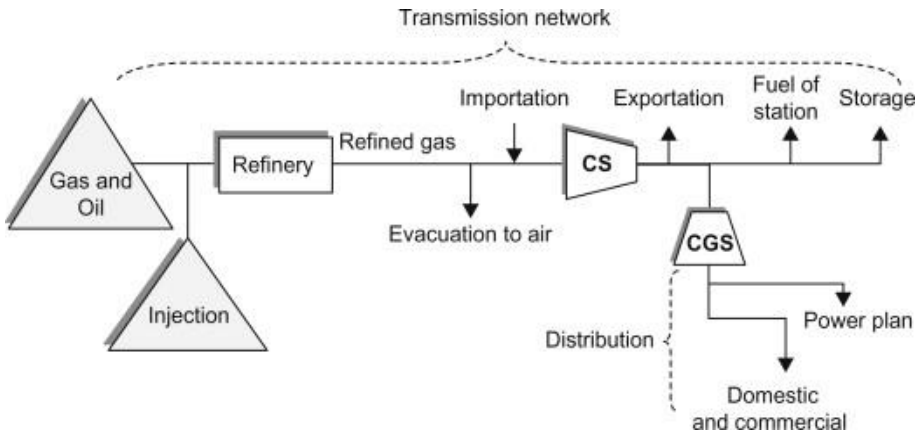
1.1. ANTECEDENTES

El transporte por tuberías también llamado transporte por ductos es un medio de transporte de gases y líquidos (hidrocarburos, materiales peligrosos, alimentos y CO_2, entre otros) que se viene practicando desde varias décadas y que constituye una red o un sistema de transporte.

Según Hamedi y Esmaeilian (2011) el transporte de gas natural por ductos también denominado gasoductos, es el proceso más importante en la industria petrolera, consiste en una compleja red de ductos que traslada gas natural desde diversos puntos hasta los consumidores con el fin de satisfacer sus demandas, se divide en dos: transporte y distribución.

El transporte del gas natural a los consumidores individuales se realiza a través de redes de distribución (Figura 1):

Figura 1. Proceso de transporte y distribución de gas natural por redes.



El transporte de dióxido de carbono (CO_2) por ductos también denominado ceoductos, trata de un sistema que transporta CO_2 después de su captura a un sitio de almacenamiento a través de ductos.

El primer ceoducto de larga distancia entró en funcionamiento a inicios de 1970 en los EEUU con más de 2500 km de longitud.

Entre las tecnologías que buscan eliminar el CO_2 de la atmósfera, están la Tecnología de Captura, Transporte y Almacenamiento de CO_2 (CAC), en inglés conocida como CCS (Carbon Capture and Storage), y la Tecnología Captura, Transporte, Almacenamiento y Usos y Transformación del CO_2 (CAUC), en inglés conocida como CCUS (Carbon Capture, Use and Storage). Ambas tienen objetivos similares, pero con la diferencia que ésta última busca reutilizar el CO_2 en procesos industriales convirtiéndolo en plásticos, hormigón o biocombustibles, entre otros.

Ambas consisten en atrapar el CO_2 producido en diferentes actividades industriales o de producción de energía antes de que ésta se libere a la atmósfera y constan de tres etapas fundamentales: captura de CO_2, mediante la descarbonización de combustibles; transporte del CO_2, mediante ductos, tanques y barcos; y almacenamiento mediante inyección de CO_2 supercrítico a alta presión en formaciones geológicas, reservorios salinos profundos, campos de petróleo y gas depletados y vetas de carbón no explotables.

A finales del 2022, existían 194 instalaciones CCS a gran escala en todo el mundo, de las cuales 61 se agregaron como proyectos, 30 están en operación, 11 en construcción y el resto en varias etapas de desarrollo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Analizar las similitudes y diferencias del transporte por ductos de gas natural y dióxido de carbono como alternativa de reducción en la concentración de los gases de efecto invernadero de origen antropogénico, principales contribuyentes del cambio climático.

1.2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Describir el transporte por ductos del gas natural y CO_2.
- ✓ Describir las propiedades fisicoquímicas del gas natural y CO_2.
- ✓ Describir el diseño y riesgos asociados al transporte por gasoductos y ceoductos.
- ✓ Analizar las similitudes y diferencias del transporte por gasoductos y ceoductos.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El CO_2 está presente en la atmósfera en una concentración aproximada de 0,042%, antes del inicio de la Revolución Industrial la concentración fue menor a 0,028%. Es el principal gas de efecto invernadero antropogénico y contribuyente del cambio climático que surge principalmente de la quema de combustibles fósiles para la producción de energía que viene desde grandes fuentes: centrales eléctricas, refinerías y otras instalaciones industriales.

El cambio climático es uno de los problemas ambientales más preocupantes de nuestra época que afecta a los ecosistemas terrestres, la distribución de la cobertura de los suelos, la biodiversidad vegetal y animal en el ecosistema, estructura y productividad de la vegetación y los ciclos de nutrientes y del agua.

Se espera que estas tecnologías desempeñen un papel crucial en el cumplimiento de los objetivos climáticos globales, particularmente el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) N° 13 (acción por el clima), que pretende introducir el cambio climático como cuestión primordial en las políticas, estrategias y planes de países, empresas y sociedad civil.

En consecuencia, organizaciones líderes como la Agencia Internacional de Energía (AIE), la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) y Bloomberg New Energy Finance (BNEF) efectuaron perspectivas energéticas a largo plazo para limitar el aumento de la temperatura global a 1,5°C.

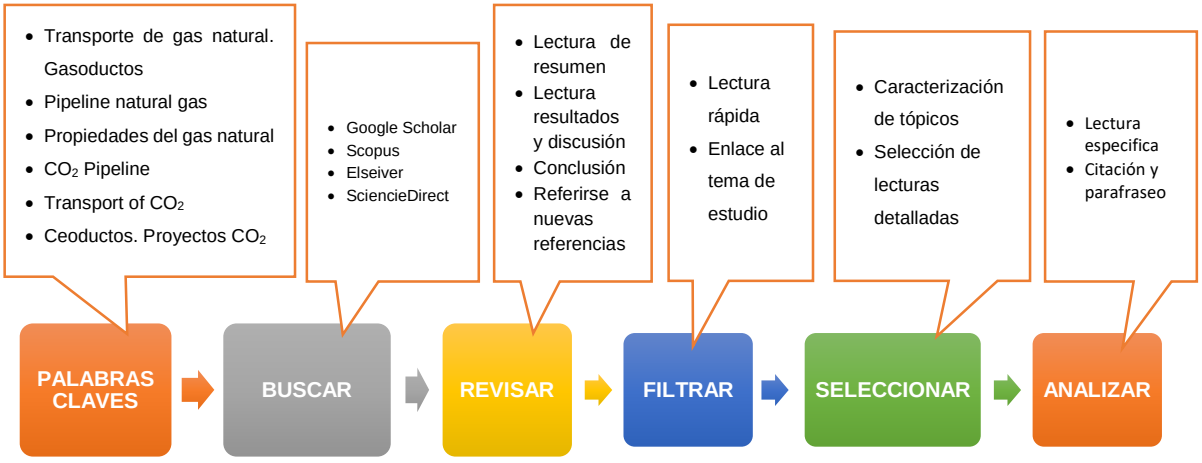
Es así, que para frenar esta alteración climática es necesario reducir de forma sustancial las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera producidas como resultado de las actividades humanas.

En ese sentido, la presente monografía pretende analizar las similitudes y diferencias del transporte por gasoductos y ceoductos del gas natural y CO_2, respectivamente, buscando reducir los gases de efecto invernadero en la atmosfera producto de la actividad industrial y quema de combustibles provocado por el hombre.

1.4. METODOLOGÍA

Para la elaboración de ésta monografía se siguió el flujograma mostrado en la Figura 2.

Figura 2. Flujograma seguido para la elaboración de la presente monografía.



En el marco de la investigación descriptiva y enfoque cualitativo, inicialmente se efectuó la búsqueda bibliográfica en fuentes primarias y secundarias introduciendo las palabras claves: transporte de gas natural, gasoductos, pipeline natural gas, propiedades del gas natural, CO_2 Pipeline, transport of CO_2, ceoductos y proyectos de CO_2, en buscadores académicos como: google scholar, scopus, elseiver y SciencieDirect.

En consecuencia, la información resultante (artículos científicos, publicaciones e informes gubernamentales, libros de referencia y sitios web de organizaciones académicas, entre otros) fue gestionada en Mendeley, donde se revisó y analizó los resúmenes, resultados y discusiones, conclusiones y referencias y finalmente se generó las citas y parafraseo para su incorporación a la monografía.

CAPÍTULO II DESARROLLO

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Marco Conceptual

2.1.1.1. Transporte del gas natural

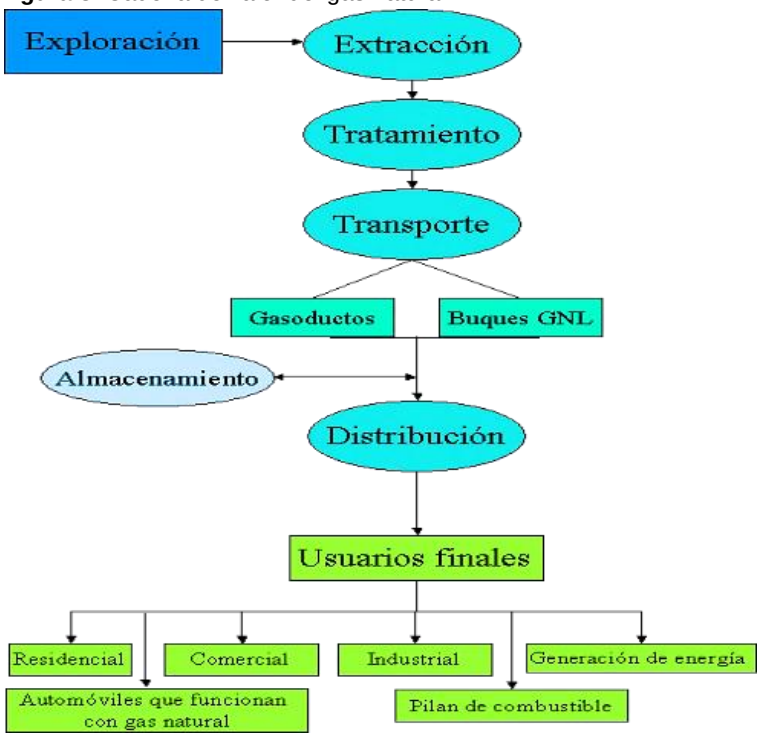
2.1.1.1.1. *Gas Natural*

Es una mezcla de hidrocarburos gaseosos que se encuentra desde hace millones de años en el subsuelo, usualmente se encuentra acompañado del petróleo (gas asociado), pero también puede encontrarse en forma aislada (gas no asociado), arrastra desde los reservorios componentes indeseables como: Ácido Sulfhídrico (H_2S), Dióxido de Carbono (CO_2), Nitrógeno (N_2), entre otros.

2.1.1.1.2. *Cadena de valor del gas natural*

La Figura 3 muestra los eslabones de la cadena de valor del gas natural: exploración y producción, tratamiento y extracción, fraccionamiento, transporte y distribución.

Figura 3. Cadena de valor del gas natural.



Transporte y Distribución: ambos eslabones constituyen el vínculo entre las actividades asociadas a la extracción y adecuación del gas natural y el consumidor final.

- ✓ **Transporte:** conjunto de actividades necesarias para recibir, trasladar y entregar el gas natural desde un punto de producción o recolección a un punto de distribución, para ello se requiere el uso de gasoductos y plantas de compresión si se transmite el hidrocarburo en estado gaseoso o facilidades de licuefacción, regasificación y desplazamiento.
- ✓ **Distribución:** conjunto de actividades que permiten recibir, trasladar, entregar y comercializar gas natural desde el punto de recepción en el sistema de transporte hasta los puntos de consumo, mediante sistemas de distribución industrial y doméstico.

2.1.1.1.3. *Composición*

No existe una composición o mezcla que se pueda tomar para generalizar la composición del gas natural. Cada gas tiene su propia composición, de hecho, dos pozos de un mismo reservorio pueden tener composiciones diferentes entre sí.

Tabla 1. Composición típica del gas natural.

Componentes	Formula	Gas no asociado	Gas asociado
Metano	CH_4	95-98 %	60-80 %
Etano	C_2H_4	1-3 %	10-20 %
Propano	C_3H_6	0.5-1 %	5-12 %
Butano	C_4H_8	0.2-0.5 %	2-5 %
Pentano	C_5H_{10}	0.2-0.5 %	1-3 %
Dióxido de carbono	CO_2	0-8 %	0-8 %
Nitrógeno	N_2	0-5 %	0-5 %
Ácido sulfhídrico	H_2S	0-5 %	0-5 %
Otros	He,Ne,Xe	Trazas	Trazas

Cuando el gas natural es extraído presenta impurezas que se deben eliminar, ya que pueden provocar daños al medio ambiente, corrosión en equipos o disminuir el valor comercial del gas natural. Normalmente el gas natural está compuesto de metano (CH_4) usualmente > 85% y proporciones significativas de etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}), y en ocasiones pentano (C_5H_{12}), y pequeñas cantidades de hexano (C_6H_{14}), como se muestra en la Tabla 1.

2.1.1.1.4. *Densidad*

Representa la cantidad de gas natural contenida en un volumen dado bajo ciertas condiciones de presión y temperatura. Se mide en términos de masa por unidad de volumen. Las unidades que se manejan son kg/m^3; lb/ft^3; g/cm^3; slug/ft^3 y otras más.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

ρ= Densidad del gas

m= Masa del Gas

V= Volumen ocupado por el gas

2.1.1.1.5. *Gravedad Especifica*

Conocido por sus siglas “SG”, “GE” o “G”, es la medida de cuan pesado es el gas natural en comparación con el aire a condiciones similares. Es expresada como la relación entre la densidad del gas y la densidad del aire. Es una cantidad adimensional expresado por:

$$GE = \frac{\rho_g}{\rho_{aire}}$$

SG= Gravedad específica, adimensional

ρg= Densidad del gas

$\rho aire$= Densidad del aire

Las dimensiones de la densidad del gas y del aire deben ser necesariamente las mismas y medidas en las mismas condiciones de presión y temperatura.

También se puede calcular la gravedad especifica si se conoce el peso molecular de un gas en particular, esto dividiendo su peso molecular entre el peso molecular del aire, tal que:

$$GE = \frac{M_g}{M_{aire}}$$

SG= Gravedad específica, adimensional

M_g= Masa molecular del gas

M_{aire}= Masa molecular del aire = 28,9625 [g/mol]

Como el gas natural es una mezcla de gases, el peso molecular solo es un peso molecular aparente. Se debe conocer el peso molecular de cada gas componente así también como los porcentajes o fracciones molares de estos para así tener el peso promedio ponderado del gas natural:

$$GE = \frac{(y_1 * M_1) + (y_2 * M_2) + (y_3 * M_3) + \cdots}{28.9625}$$

SG= Gravedad específica, adimensional

y_1= Fracción molar del metano

M_1= Masa molecular del metano

y_2= Fracción molar del etano

M_2= Masa molecular del etano

y_3= Fracción molar del propano

M_3= Masa molecular del propano

Estas masas moleculares de cada gas se pueden encontrar en la Tabla 2.

2.1.1.1.6. *Viscosidad*

La viscosidad de un fluido representa su resistencia a fluir, cuanto mayor sea la viscosidad, más difícil es fluir. Los fluidos de menor viscosidad fluyen fácilmente en los ductos y causan menos caída de presión. Los líquidos tienen valores de viscosidad mucho mayores en comparación con los gases.

El número de Reynolds es un parámetro adimensional usado para clasificar el caudal en los ductos. La viscosidad absoluta, también conocido como viscosidad dinámica, es expresado en lb/ft-s o Poises.

La viscosidad cinemática es simplemente la viscosidad absoluta dividida por la densidad:

$$\mathrm{u} = \frac{\mu}{\rho}$$

u= Viscosidad cinemática, ft^2/s

μ= Viscosidad dinámica, lb/ft-s

ρ= Densidad, lb/ft^3

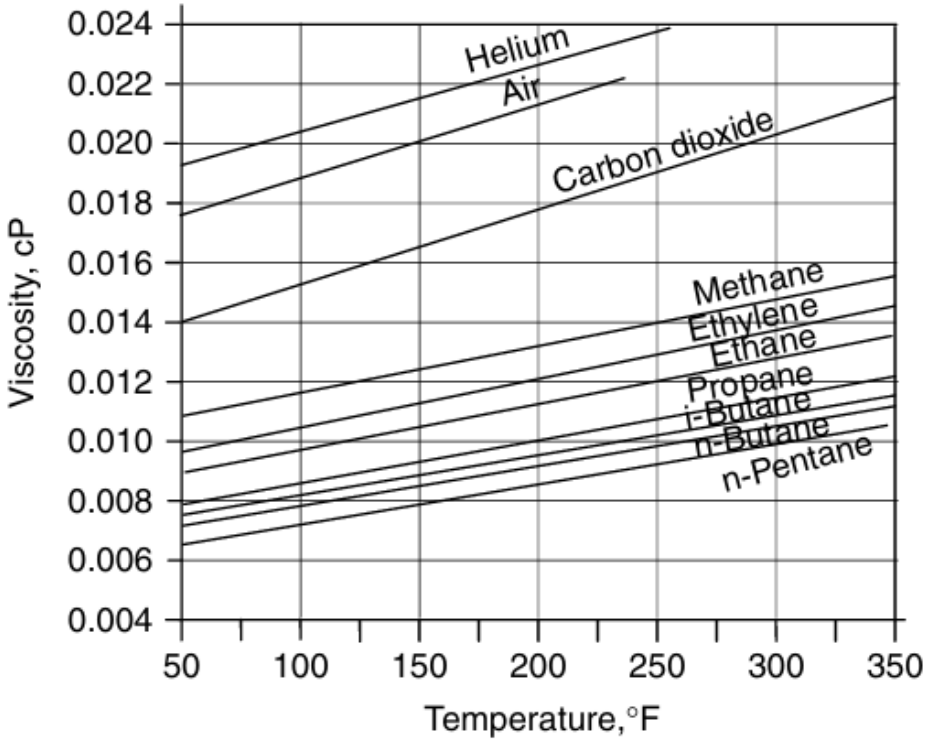
Tabla 2. Propiedades de los gases.

Gas	Formula	Molecular Weight	Vapor Pressure psia at 100°F	Critical Constants			Ideal Gas 14.696 psia, 60°F		Specific Heat, Btu/lb/°F 14.696 psia, 60°F
				Pressure psia	Temperature °F	Volume ft³/lb	Spgr (air=1.00)	ft³/lb-gas	Ideal Gas
Methane	CH_4	16.0430	5000	666.0	−116.66	0.0988	0.5539	23.654	0.52676
Ethane	C_2H_6	30.0700	800	707.0	90.07	0.0783	1.0382	12.620	0.40789
Propane	C_3H_8	44.0970	188.65	617.0	205.93	0.0727	1.5226	8.6059	0.38847
Isobutane	C_4H_{10}	58.1230	72.581	527.9	274.4	0.0714	2.0068	6.5291	0.38669
n-butane	C_4H_{10}	58.1230	51.706	548.8	305.52	0.0703	2.0068	6.5291	0.39500
Iso-pentane	C_5H_{12}	72.1500	20.443	490.4	368.96	0.0684	2.4912	5.2596	0.38448
n-pentane	C_5H_{12}	72.1500	15.575	488.1	385.7	0.0695	2.4912	5.2596	0.38831
Neo-pentane	C_5H_{12}	72.1500	36.72	464.0	321.01	0.0673	2.4912	5.2596	0.39038
n-hexane	C_6H_{14}	86.1770	4.9596	436.9	453.8	0.0688	2.9755	4.4035	0.38631
2-methyl pentane	C_6H_{14}	86.1770	6.769	436.6	435.76	0.0682	2.9755	4.4035	0.38526
3-methyl pentane	C_6H_{14}	86.1770	6.103	452.5	448.2	0.0682	2.9755	4.4035	0.37902
Neo hexane	C_6H_{14}	86.1770	9.859	446.7	419.92	0.0667	2.9755	4.4035	0.38231
2,3-dimethylbutane	C_6H_{14}	86.1770	7.406	454.0	440.08	0.0665	2.9755	4.4035	0.37762
n-Heptane	C_7H_{16}	100.2040	1.621	396.8	512.8	0.0682	3.4598	3.7872	0.38449
2-Methylhexane	C_7H_{16}	100.2040	2.273	396.0	494.44	0.0673	3.4598	3.7872	0.38170
3-Methylhexane	C_7H_{16}	100.2040	2.13	407.6	503.62	0.0646	3.4598	3.7872	0.37882
3-Ethylpentane	C_7H_{16}	100.2040	2.012	419.2	513.16	0.0665	3.4598	3.7872	0.38646
2,2-Dimethylpentane	C_7H_{16}	100.2040	3.494	401.8	476.98	0.0665	3.4598	3.7872	0.38651
2,4-Dimethylpentane	C_7H_{16}	100.2040	3.294	397.4	475.72	0.0667	3.4598	3.7872	0.39627
3,3-Dimethylpentane	C_7H_{16}	100.2040	2.775	427.9	505.6	0.0662	3.4598	3.7872	0.38306
Triptane	C_7H_{16}	100.2040	3.376	427.9	496.24	0.0636	3.4598	3.7872	0.37724
n-octane	C_8H_{18}	114.2310	0.5371	360.7	564.15	0.0673	3.9441	3.322	0.38334
Di Isobutyl	C_8H_{18}	114.2310	1.1020	361.1	530.26	0.0676	3.9441	3.322	0.37571
Isooctane	C_8H_{18}	114.2310	1.7090	372.7	519.28	0.0657	3.9441	3.322	0.38222
n-Nonane	C_9H_{20}	128.2580	0.17155	330.7	610.72	0.0693	4.4284	2.9588	0.38248
n-Decane	$C_{10}H_{22}$	142.2850	0.06088	304.6	652.1	0.0702	4.9127	2.6671	0.38181
Cyclopentane	C_5H_{10}	70.1340	9.917	653.8	461.1	0.0594	2.4215	5.411	0.27122
Methylcyclopentane	C_6H_{12}	84.1610	4.491	548.8	499.28	0.0607	2.9059	4.509	0.30027
Cyclohexane	C_6H_{12}	84.1610	3.267	590.7	536.6	0.0586	2.9059	4.509	0.29012
Methylcyclohexane	C_7H_{14}	98.1880	1.609	503.4	570.2	0.0600	3.3902	3.8649	0.31902
Ethylene	C_2H_4	28.0540	1400	731.0	48.54	0.0746	0.9686	13.527	0.35789
Propylene	C_3H_6	42.0810	232.8	676.6	198.31	0.0717	1.4529	9.0179	0.35683
Butylene	C_4H_8	56.1080	62.55	586.4	296.18	0.0683	1.9373	6.7636	0.35535
Cis-2-butene	C_4H_8	56.1080	45.97	615.4	324.31	0.0667	1.9373	6.7636	0.33275
Trans-2-butene	C_4H_8	56.1080	49.88	574.9	311.8	0.0679	1.9373	6.7636	0.35574
Isobutene	C_4H_8	56.1080	64.95	580.2	292.49	0.0681	1.9373	6.7636	0.36636
1-Pentene	C_5H_{10}	70.1340	19.12	509.5	376.86	0.0674	2.4215	5.411	0.35944
1,2-Butadene	C_4H_6	54.0920	36.53	656.0	354	0.0700	1.8677	7.0156	0.34347
1,3-Butadene	C_4H_6	54.0920	59.46	620.3	306	0.0653	1.8677	7.0156	0.34223
Isoprene	C_5H_8	68.1190	16.68	582.0	403	0.0660	2.3520	5.571	0.35072
Acetylene	C_2H_2	26.0380		890.4	95.29	0.0693	0.8990	14.574	0.39754
Benzene	C_6H_6	78.1140	3.225	710.4	552.15	0.0531	2.6971	4.8581	0.24295
Toluene	C_7H_8	92.1410	1.033	595.5	605.5	0.0549	3.1814	4.1184	0.26005
Ethyl-benzene	C_8H_{10}	106.1670	0.3716	523	651.22	0.0564	3.6657	3.5744	0.27768
o-Xylene	C_8H_{10}	106.1670	0.2643	541.6	674.85	0.0557	3.6657	3.5744	0.28964
m-Xylene	C_8H_{10}	106.1670	0.3265	512.9	650.95	0.0567	3.6657	3.5744	0.27427
p-Xylene	C_8H_{10}	106.1670	0.3424	509.2	649.47	0.0572	3.6657	3.5744	0.27470
Styrene	C_8H_8	104.1520	0.2582	587.8	703	0.0534	3.5961	3.6435	0.26682
Isopropylbenzene	C_9H_{12}	120.1940	0.188	465.4	676.2	0.0569	4.1500	3.1573	0.30704
Methyl alcohol	CH_4O	32.0420	4.631	1174	463.01	0.0590	1.1063	11.843	0.32429
Ethyl alcohol	C_2H_6O	46.0690	2.313	891.7	465.31	0.0581	1.5906	8.2372	0.33074
Carbon monoxide	CO	28.0100		506.8	−220.51	0.0527	0.9671	13.548	0.24847
Carbon dioxide	CO_2	44.0100		1071	87.73	0.0342	1.5196	8.6229	0.19909
Hydrogen sulfide	H_2S	34.0820	394.59	1306	212.4	0.0461	1.1768	11.134	0.23838
Sulfur dioxide	SO_2	64.0650	85.46	1143	315.7	0.0305	2.2120	5.9235	0.14802
Ammonia	NH_3	17.0305	211.9	1647	270.2	0.0681	0.5880	22.283	0.49678
Air	N_2+O_2	28.9625		546.9	−221.29	0.0517	1.0000	13.103	0.2398
Hydrogen	H_2	2.0159		187.5	−400.3	0.5101	0.06960	188.25	3.4066
Oxygen	O_2	31.9988		731.4	−181.4	0.0367	1.1048	11.859	0.21897
Nitrogen	N_2	28.0134		493	−232.48	0.0510	0.9672	13.546	0.24833
Chlorine	Cl_2	70.9054	157.3	1157	290.69	0.0280	2.4482	5.3519	0.11375
Water	H_2O	18.0153	0.95	3200.1	705.1	0.04975	0.62202	21.065	0.44469
Helium	He	4.0026		32.99	−450.31	0.2300	0.1382	94.814	1.24040
Hydrogen chloride	HCl	36.4606	906.71	1205	124.75	0.0356	1.2589	10.408	0.19086

Otras unidades de viscosidad en unidades del Sistema Internacional incluyen centipoise para viscosidad dinámica y centistokes para la viscosidad cinemática.

La viscosidad de un gas depende de su temperatura y presión. A diferencia de los líquidos, la viscosidad de un gas aumenta con el aumento de la temperatura. Dado que la viscosidad representa resistencia al flujo, a medida que aumenta la temperatura del gas, la cantidad de gas que fluye a través de un ducto disminuye; por lo tanto, es posible un mayor rendimiento en un gasoducto a menor temperatura. Esto contrasta fuertemente con el flujo de líquido, donde el rendimiento aumenta con la temperatura debido a la disminución de la viscosidad y viceversa (Figura 4).

Figura 4. Viscosidad vs Temperatura.



La fórmula que se utiliza para calcular la viscosidad a partir de las viscosidades de los gases, es:

$$\mu = \frac{\sum(\mu_i y_i \sqrt{M_i})}{\sum(y_i \sqrt{M_i})}$$

μ= Viscosidad Dinámica de la mezcla de gas

μ_i= Viscosidad Dinámica del componente de gas puro

y_i= Fracción molar del componente de gas puro

M_i= Masa molecular del componente de gas puro

Tabla 3. Viscosidad de gases.

Gas	Viscosidad (lb/ft-s)
Metano	0,00000749
Etano	0,00000623
Propano	0,00000525
i-Butano	0,00000497
n-Butano	0,00000511
i-Pentano	0,00000462
n-Pentano	0,00000462
Hexano	0,00000441
Heptano	0,00000413
Octano	0,0000035
Nonano	0,00000336
Decano	0,00000315
Etileno	0,00000686
CO	0,00001288
CO_2	0,00001029
H_2S	0,00000854
Aire	0,00001246

2.1.1.1.7. *Gases Ideales*

Un gas ideal se define como un fluido en el que el volumen de las moléculas de gas es despreciable en comparación con el volumen ocupado por el gas. Además, la atracción o repulsión entre las moléculas de gas individuales y el recipiente es despreciable. También, en un gas ideal, las moléculas se consideran perfectamente elásticas y no hay pérdida de energía resultante de la colisión entre las moléculas. Tales gases ideales se dicen obedecer varias leyes de los gases, como la ley de Boyle, lde Charles y de los gases ideales o la ecuación de los gases perfectos.

La ley de los gases ideales, a veces denominada ecuación de los gases perfectos simplemente establece que la presión, el volumen y la temperatura del gas:

$$PV = nRT$$

P= Presión absoluta, psia

V= Volumen del gas, ft^3

n= Numero de moles, lb-mol

R= Constante universal de los gases,10,73 psia ft^3/lb-mol °R

T= Temperatura absoluta del gas, °R

2.1.1.1.8. *Gases Reales*

Básicamente la magnitud de desviación de los gases reales con respecto a los gases ideales incrementa con la presión y temperatura, variando también con la composición. El comportamiento de un gas real es diferente a un gas ideal, la razón para esto es que la ley de los gases perfectos fue derivada bajo la suposición de que el volumen de moléculas es insignificante y no existe atracción o repulsión entre las moléculas, lo cual no es el caso para gases reales.

En la práctica, los gases no se comportan de acuerdo con la ley definida por la ecuación para las presiones y temperaturas de trabajo. Para expresar de forma más real la relación entre la P, V y T, se incorpora un factor de corrección, denominado factor de compresibilidad de gas Z:

$$PV = ZnRT$$

P= Presión absoluta, psia

V= Volumen del gas, ft^3

Z= Factor de Compresibilidad, adimensional

n= Numero de moles, lb-mol

R= Constante universal de los gases,10,73 psia ft^3/lb-mol °R

T= Temperatura absoluta del gas, °R

2.1.1.1.9. *Mezcla de gases*

Las propiedades de una mezcla de gases pueden ser determinadas a partir de las propiedades de los componentes puros.

Cuando el gas se compone de una mezcla de diferentes gases, la temperatura y la presión críticas de la mezcla gaseosa se llaman temperatura pseudo-crítica y presión pseudo-critica, respectivamente. Si se conoce la composición de la mezcla de gases, se puede calcular estos valores pseudo- criticos de las mezclas utilizando la presión crítica y temperatura critica de los componentes puros de la mezcla de gases:

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \qquad\qquad P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}}$$

T= Temperatura absoluta del gas, °R

P= Presión absoluta del gas, psia

T_{pr}= Temperatura pseudo-reducida, adimensional

P_{pr}= Presión pseudo-reducida, adimensional

T_{pc}= Temperatura pseudo-critica, °R

P_{pc}= Presión pseudo-critica, psia

Similar a las fracciones dadas de los componentes de la mezcla gaseosa, estas pueden ser calculadas a través del promedio ponderado de las propiedades críticas de cada componente y su fracción molar en la mezcla:

$$T_{pc} = \sum y_i T_{ci} \qquad P_{pc} = \sum y_i P_{ci}$$

T_{pc}= Temperatura pseudo-critica, °R

P_{pc}= Presión pseudo-critica, psia

y_i= Fracción molar del componente, adimensional

T_{ci}= Temperatura critica del componente, °R

P_{ci}= Presión critica del componente, psia

2.1.1.1.10. *Factor de compresibilidad Z*

Por definición, es la razón del volumen que realmente ocupa un gas a determinada presión y temperatura con respecto al volumen que ocuparía ese mismo gas si se comportara como ideal, es un factor de corrección, que se introduce en la ecuación de estado de gas ideal para modelar el comportamiento de los gases reales, tomando como referencia los valores del punto crítico, es decir, si la temperatura es mucho más alta que

la del punto crítico, el gas puede tomarse como ideal, y si la presión es mucho más baja que la del punto crítico el gas también se puede tomar como ideal.

2.1.1.1.11. *Numero de Reynolds*

El número de Reynolds permite caracterizar la naturaleza del flujo, es decir, si se trata de un flujo laminar o de un flujo turbulento; además indica la importancia relativa de la tendencia del flujo hacia un régimen turbulento respecto de uno laminar y la posición relativa de este estado a lo largo de determinada longitud y se calcula con:

$$NR = 0{,}0004778 * \left(\frac{P_b}{T_b}\right) * \left(\frac{GE * Q}{\mu * d}\right)$$

NR= Numero de Reynolds, adimensional

T_b= Temperatura base, 492 °R

P_b= Presión base, 14,73 psia

GE= Gravedad especifica del gas natural, adimensional

Q= Caudal de gas medido a condiciones estándar, ft^3/día (SCFD)

μ= Viscosidad del gas, lb/ft-s

d= Diámetro interno del ducto, plg.

2.1.1.1.12. *Ecuación de Colebrook White*

La ecuación de Colebrook sirve para calcular el factor de fricción y caudales utilizando la ecuación general en flujo turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7 * d} + \frac{2{,}51}{NR * \sqrt{f}}\right)$$

f= Factor de fricción, adimensional

ε= Rugosidad absoluta del ducto, plg

d= Diámetro interno del ducto, plg

NR= Numero de Reynolds, adimensional

En la Tabla 4, se muestra valores tipitos de rugosidad interna de ductos usados para calcular el factor de fricción.

Tabla 4. Rugosidades de distintos materiales.

Pipe material	Roughness, in.	Roughness, mm.
Riveted Steel	0,0354 to 0,354	0,9 to 9,0
Commercial Steel/welded Steel	0,0018	0,045
Cast iron	0,0102	0,26
Galvanized iron	0,0059	0,15
Asphalted cast iron	0,0047	0,12
Wrought iron	0,0018	0,045
Pvc, drawn tubing, glass	0,000059	0,0015
Concrete	0,0118 to 0,118	0,3 to 3,0

2.1.1.1.13. *Ecuación de Colebrook White modificada*

La modificación da como resultado un factor de fricción más alto y, por lo tanto, un valor más pequeño del factor de transmisión. Debido a esto, se obtiene un valor conservador de caudal debido a la mayor fricción y caída de presión. La versión modificada de la ecuación es la siguiente:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7 * d} + \frac{2{,}825}{NR * \sqrt{f}}\right)$$

2.1.1.1.14. *Normativa aplicable al diseño y construcción de gasoductos*

El diseño, construcción y operación de gasoductos, admite riesgos por las características del flujo que este opera, por esta razón, se han desarrollado códigos y estándares internacionales y nacionales a fin de minimizar los factores de riesgo.

Los códigos y normas informan sobre los requisitos básicos y mínimos para garantizar un sistema seguro de transporte. Mediante la consulta de normas y estándares de la industria se definen y validan parámetros de diseños claros que determinan las características y resistencia de materiales y condiciones operacionales, las cuales permiten validar la operación y funcionamiento según el proyecto.

- ✓ **Organización Internacional para la Estandarización, ISO**

  Facilita la coordinación y unificación internacional de normas internacionales cuyo propósito es promover el desarrollo de la estandarización y de las actividades mundiales, para facilitar el intercambio internacional de bienes, productos y servicios

y desarrollar cooperación en la actividad intelectual, científica, tecnológica y económica.

- ✓ **American Welding Society, AWS**

  Es una sociedad americana de soldadura con el objetivo de adelantar la ciencia, tecnología y aplicación de la soldadura y las relacionadas.

- ✓ **American National Standards Institute, ANSI**

  Administra y coordina la estandarización voluntaria americana. Refuerza la competitividad de la industria americana y su calidad.

- ✓ **American Society of Mechanical Engineers, ASME**

  Desarrolla normas aplicables a ductos y desarrolla códigos y normas para la ingeniería, la industria, el público y el gobierno.

- ✓ **American Petroleum Institute, API**

  Cubre la producción de materiales y lubricantes y certificación para tanques de almacenamiento, recipientes de presión e inspectores de ductos.

- ✓ **National Association of Corrosion Engineers, NACE**

  Promueve el conocimiento público de la salud, seguridad, materiales de medio ambiente y económicas para el control de la corrosión, degradación de los materiales, promoción, diseño e investigación, las consecuencias y los beneficios del control de la corrosión para conservar la infraestructura y conservar los recursos.

- ✓ **American Gas Association, AGA**

  Normas internacionales para el diseño y construcción de fluidos gaseosos.

- ✓ **American Society for Testing and Materials, ASTM**

  Sociedad americana de prueba de materiales. Desarrollo y publicación de estándares para materiales, productos, sistemas y servicios.

- ✓ **Amerian Petroleum Institute**

  API 5L Specification for Line Pipe (Especificaciones de ductos)

  API 6D Specification for Line (Especificación de válvulas)

  API 6G Pipe valves, end closures, connectors and swivels (accesorios de tuberías)

  API 1102 Steel pipelines crossing railroads and highways (cruces especiales)

  API 1104 Welding of pipelines and related facilities (Soldadura)

  API 1107 Pipelines maintenance welding practices (Mantenimiento de soldaduras)

  API 1110 Pressure Testing (Pruebas Hidrostáticas)

2.1.1.2. Transporte de CO_2

2.1.1.2.1. *Dióxido de carbono*

El CO_2 es uno de los principales gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global, se deriva principalmente de la producción industrial y la generación de energía. Una vez que el CO_2 es capturado y acondicionado a parámetros de salida adecuados en composición, presión y temperatura, entra en juego la etapa de transporte hasta su almacenamiento.

El CO_2 puede ser transportado por:

- ✓ Ductos, también llamadas ceoductos, similares a los gasoductos utilizados por la industria del gas natural.
- ✓ Camiones cisternas
- ✓ Buques, si la fuente de CO_2 está muy alejada del área de almacenamiento.

El CO_2 puro es una sustancia incolora, inodora y no inflamable a presión y temperatura ambiente. El CO_2 está presente de forma natural en la atmósfera y constituye alrededor del 0,038% de su volumen. El estado físico del CO_2 varía con la temperatura y la presión: a temperatura y presión normal es un gas, a bajas temperaturas es un sólido, a temperaturas intermedias (entre -56,5 °C y 31,1 °C, el CO_2 puede pasar de vapor a líquido comprimiéndolo a la presión de licuefacción correspondiente). En la Tabla 5 se muestran las propiedades del CO_2.

Tabla 5. Propiedades del CO_2.

Propiedad	Unidad	Valor
Peso molecular	gramos mol^{-1}	44,01
Presión crítica	bar	73,8
Temperatura crítica	°C	31.1
Densidad crítica	kilos m^{-3}	467
Presión de punto triple	bar	5.2
Temperatura de punto triple	°C	-56,5
Densidad del gas (a 0°C y 1,013 bar)	kilos m^{-3}	1,976
Densidad del líquido (a -20 °C y 19,7 bar)	kilos m^{-3}	1032

2.1.1.2.2. *Usos y aplicaciones*

Uso doméstico**:** utilizado en la conservación de alimentos y bebidas, es el agente criogénico clave en el enfriamiento, refrigeración y aplicaciones de congelación para proteger el sabor y textura de sus alimentos manteniendo el control de la temperatura apropiada, también es un ingrediente esencial para las bebidas carbonatadas.

Uso comercial: en la medicina se utiliza para la insuflación y por lo regular se combina con oxígeno o aire como estimulante respiratorio para promover la respiración profunda; tratamiento de agua y aguas residuales, se emplean para la reducción del pH lo que reduce costos y mejora la seguridad y flexibilidad de la planta.

Uso vehicular: producción de combustibles basados en carbono, principalmente metanol.

Uso industrial: en la soldadura y metalmecánica se mezcla con el argón como gas de protección utilizado para prevenir la contaminación atmosférica de metal fundido en los procesos de soldadura por arco eléctrico; en la industria de la pulpa y papel para controlar los niveles del pH.

Hernández (2014) describe además otros usos del CO_2:

a) Recuperación mejora de hidrocarburos

EOR: reduce la viscosidad del petróleo para facilitar su flujo o aumentar la presión del reservorio para contribuir su extracción a través de los poros de la roca.

Recuperación de metano: las moléculas de metano son desplazadas a las fracturas del carbón y a los ´pozos de producción. El CO_2 queda atrapado en los microporos y tan solo una pequeña parte llega hasta los pozos de producción, mientras haya una cantidad apreciable de metano a extraer.

Recuperación de gas: la inyección de CO_2 permite una mejora de la producción en los reservorios de gas aportando presión adicional y evitando subsidencia e intrusiones de agua.

b) **Cumplimiento de reducción de emisiones,** el CO_2 se almacena en formaciones salinas o reservorios de petróleo abandonados.
c) **Uso industrial,** el CO_2 se transporta hasta invernaderos para contribuir a la estimulación del crecimiento de las plantaciones.

2.1.1.2.3. *Gases de efecto invernadero GEI*

Se llaman así, porque retienen parte de la radiación solar, en consecuencia, calientan la Tierra. Es un proceso natural y necesario ya que, sin ellos, el planeta sería casi 30° más frío, razón por la cual son imprescindibles para hacer posible la vida en la biosfera. Al mismo tiempo son capaces de alterar el equilibrio entre la energía entrante y saliente de la Tierra necesaria para mantener su sistema climático.

Calentamiento global: es un aumento en la temperatura de la atmósfera y de los océanos y es uno de los impactos más visibles del cambio climático.

Cambio climático: Es el conjunto de alteraciones climáticas. La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) define el cambio climático como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables.

2.1.2. Marco Contextual

Los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) están desempeñando un papel dominante en los sistemas energéticos mundiales, pero también conllevan varios impactos negativos cuando se queman produciendo CO_2 y son el mayor impulsor del cambio climático global. También contribuyen en gran medida a la contaminación del aire local, que se estima que está relacionada con millones de muertes prematuras cada año. A medida que las fuentes de energía con bajas emisiones de carbono (nuclear y renovables) se vuelven más fácilmente disponibles.

2.1.2.1. Consumo mundial de combustibles fósiles

En la Figura 5 se observa el consumo mundial de combustibles fósiles desde 1800, se nota un aumento significativo durante el último medio siglo, aproximadamente ocho veces desde 1950, duplicándose desde 1980 y en la Figura 6 el consumo mundial del gas natural. Hoy en día, el consumo de carbón se está reduciendo en muchas partes del mundo, pero el petróleo y el gas natural crecen rápidamente.

Figura 5. Consumo mundial de combustibles fósiles-energía primaria.

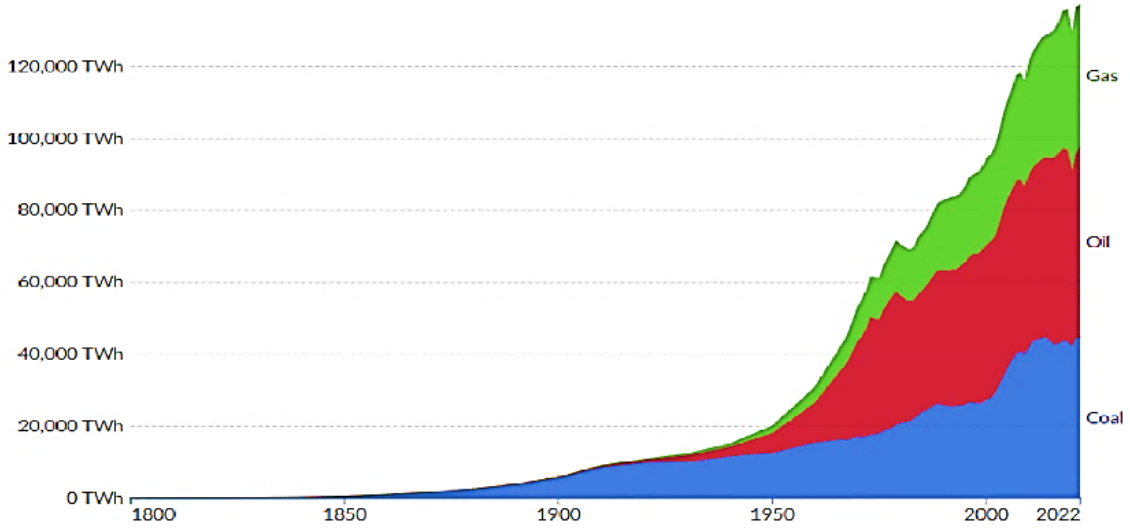
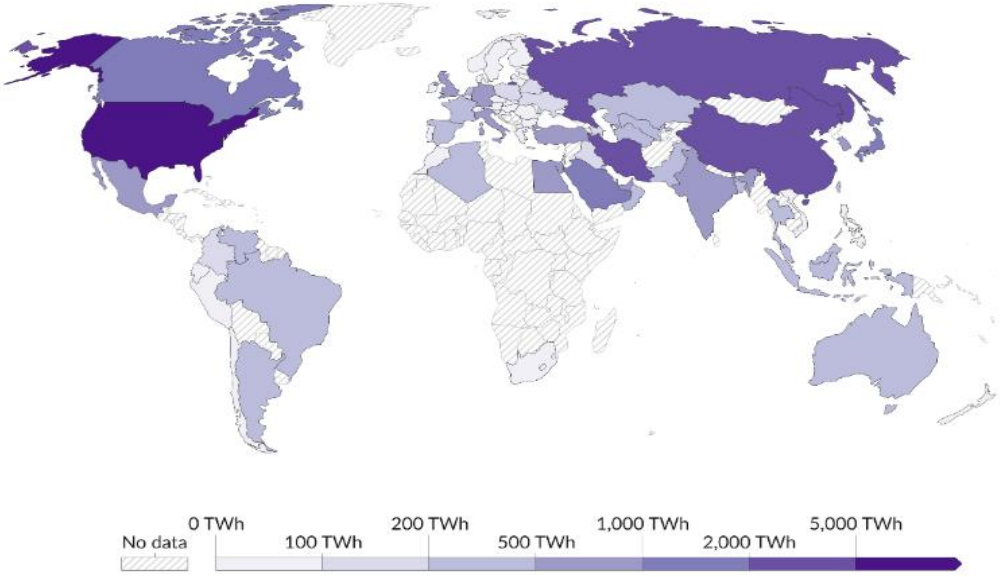


Figura 6. Consumo mundial del gas natural, medido en TW-h.



2.1.2.2. Emisiones de CO_2 per cápita mundial

Las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero son el principal impulsor del cambio climático en la actualidad. El CO_2 y otros gases de efecto invernadero como el metano y el óxido nitroso se emiten cuando se quema combustibles fósiles (el carbón, el petróleo y gas natural) y cuando procede de materiales como acero, cemento y plásticos y se cultiva los alimentos que se come. En la Figura 7 se observa las emisiones de CO_2 procedentes de los combustibles fósiles y la industria y en la Figura 8 se muestra las emisiones de CO_2 procedentes de los combustibles fósiles y la industria.

Figura 7. Emisiones de CO_2 per cápita, 2022 a nivel mundial.

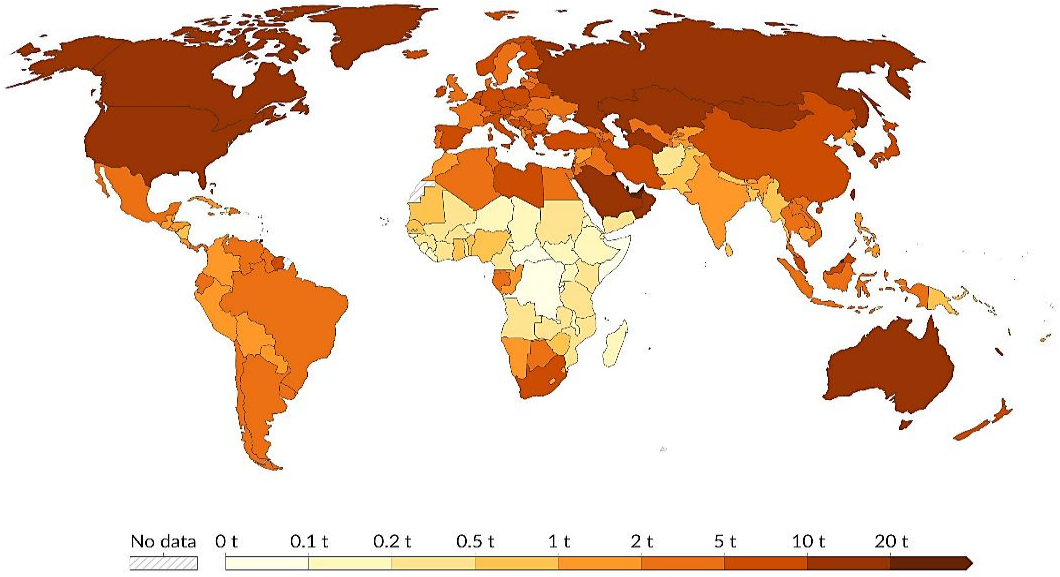
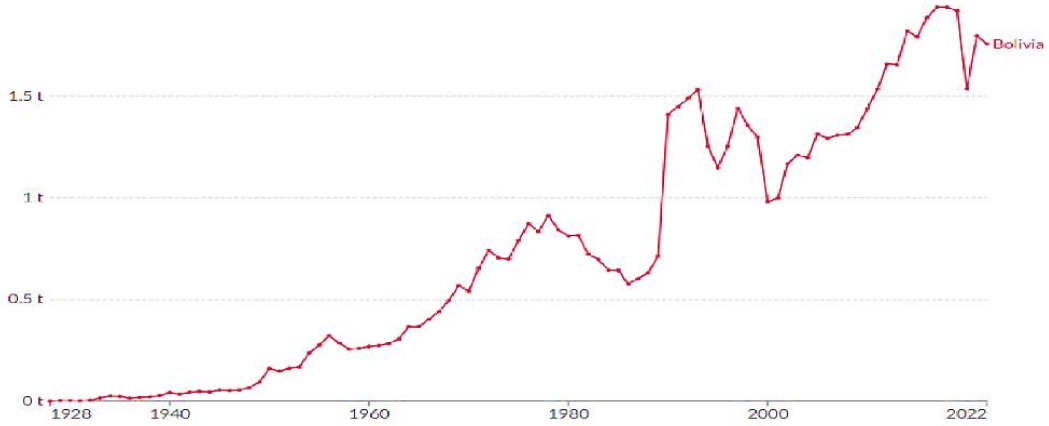


Figura 8. Emisiones de CO_2 per cápita en Bolivia.



2.2. INFORMACIÓN Y DATOS OBTENIDOS

2.2.1. Ecuación general del flujo de gases

La ecuación de flujo general, también llamada ecuación de flujo fundamental, para el flujo isotérmico en estado estacionario en un gasoducto y/o ceoducto es la ecuación básica para relacionar la caída de presión con el caudal. La forma más común de esta ecuación es:

$$Q = 38,774 * \left(\frac{T_b}{P_b}\right) * F * \left[\frac{(P_1^2 - P_2^2) - 0{,}0375 * \left(\frac{GE * P^2}{Z_m * Z_f}\right) * (H_2 - H_1)}{GE * L * Z_m * T_f}\right]^{0,5} * d^{2,5} * E$$

Q= Caudal de gas medido a condiciones estándar, ft^3/día (SCFD)

T_b= Temperatura base, 492 °R

P_b= Presión base, 14,73 psia

F= Factor de transmisión, adimensional

P_1= Presión de entrega, psia

P_2= Presión de salida, psia

GE= Gravedad especifica del gas natural, adimensional

P_m= Presión promedio del gas, psia

Z_m= Factor de compresibilidad promedio del gas, adimensional

T_f= Temperatura de flujo de gas (isotérmico), °R

H_1= Altura inicial, ft

H_2= Altura final, ft

L= Longitud del ducto, millas

d= Diámetro interno del ducto, plg

E= Factor de eficiencia del ducto (valor menor o igual a 1), adimensional

2.2.2. Ecuación de Weymouth

Esta ecuación es usada para altas presiones, alto caudal y para un diámetro que este entre 2 a 12 pulgadas. Usa las variables de la ecuación general de flujo de gas aislando el factor de transmisión que es equivalente a:

$$F = 11{,}18 * d^{\frac{1}{6}}$$

F= Factor de transmisión, adimensional

d= Diámetro interno del ducto, plg

La ecuación de Weymouth en unidades USCS es:

$$Q = 433{,}5 * E * \left(\frac{T_b}{P_b}\right) * \left[\frac{P_1^2 - e^s P_2^2}{GE * L_e * Z_m * T_f}\right]^{0{,}5} * d^{2{,}667}$$

Q= Caudal de gas medido a condiciones estándar, ft^3/día (SCFD)

T_b= Temperatura base, 492 °R

P_b= Presión base, 14,73 psia

P_1= Presión de entrega, psia

P_2= Presión de salida, psia

GE= Gravedad especifica del gas natural, adimensional

s= Parámetro de ajuste de elevación, adimensional

Z_m= Factor de compresibilidad promedio del gas, adimensional

L_e= Longitud equivalente por diferencia de elevación, millas

T_f= Temperatura de flujo de gas (isotérmico), °R

d= Diámetro interno dl ducto, plg

E= Factor de eficiencia del ducto (valor menor o igual a 1), adimensional

2.2.3. Ecuación Panhadle A

La ecuación Panhandle A fue desarrollada para su uso en gasoductos de gas natural y puede ser modificada para ceoductos, incorporando un factor de eficiencia para números de Reynolds en el rango de 5 a 11 millones. En esta ecuación la rugosidad del ducto no se utiliza. La ecuación en unidades USCS es:

$$Q = 435{,}87 * E * \left(\frac{T_b}{P_b}\right)^{1{,}0788} * \left[\frac{P_1^2 - e^s P_2^2}{GE^{0{,}8539} * L_e * Z_m * T_f}\right]^{0{,}5394} * d^{2{,}6182}$$

Q= Caudal de gas medido a condiciones estándar, ft^3/día (SCFD)

T_b= Temperatura base, 492 °R

P_b= Presión base, 14,73 psia

P_1= Presión de entrega, psia

P_2= Presión de salida, psia

GE= Gravedad especifica del gas natural, adimensional

s= Parámetro de ajuste de elevación, adimensional

Z_m= Factor de compresibilidad promedio del gas, adimensional

L_e= Longitud equivalente por diferencia de elevación, millas

T_f= Temperatura de flujo de gas (isotérmico), °R

d= Diámetro interno del ducto, plg

E= Factor de eficiencia del ducto (valor menor o igual a 1), adimensional

Al comparar la ecuación de Panhandle A con la ecuación de flujo general, se puede calcular un factor de transmisión equivalente en unidades USCS de la siguiente manera:

$$F = 7{,}2111 * \left(\frac{Q * GE}{d}\right)^{0{,}07305}$$

2.2.4. Método Standing-Katz

El método de Standing- Katz (Figura 9) se usa para calcular el factor de compresibilidad Z, se basa en el uso de un gráfico que se ha construido para mezclas binarias y vapor saturado de gases. Este método se usa generalmente para mezclas naturales de gases dulces que contienen varios componentes de hidrocarburos. Cuando la mezcla de gas natural contiene las cantidades apreciables de no hidrocarburos tal como nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y el CO_2, ciertas correcciones deben ser aplicadas.

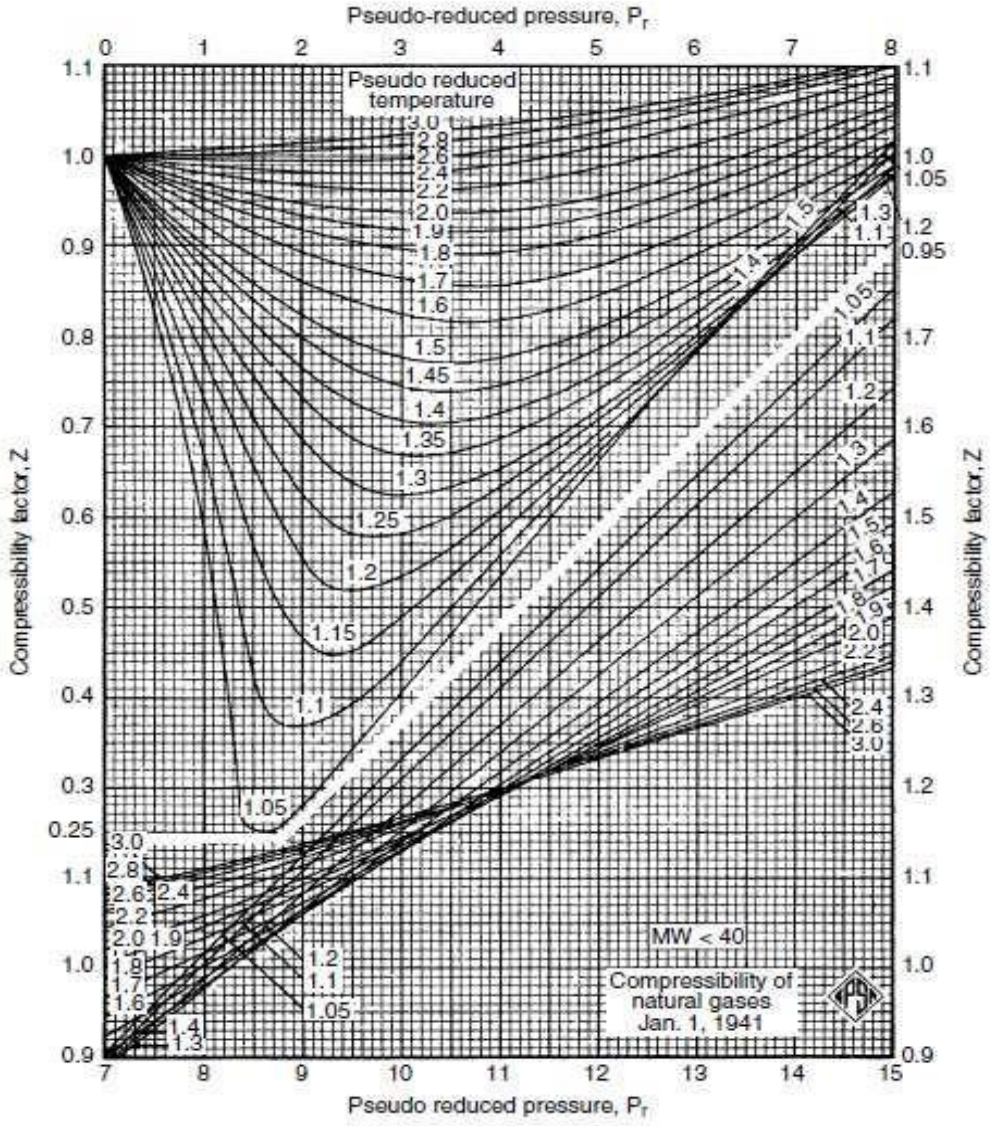
2.2.5. Método de la Asociación de Gas Natural de California (CNGA)

Es una ecuación bastante simple que permite calcular rápidamente el factor de compresibilidad Z cuando se conocen la gravedad, la temperatura y la presión del gas:

$$Z_m = \frac{1}{1 + \frac{344400 * P_m * 10^{1{,}785 * GE}}{T_f^{3{,}825}}}$$

Z_m= Factor de compresibilidad promedio del gas, adimensional

Figura 9. Gráfica para calcular el factor de compresibilidad Z.



P_m = Presión promedio del gas (presión manométrica), psig

GE= Gravedad especifica del gas natural, adimensional

T_f= Factor de compresibilidad promedio del gas, adimensional

La presión que se utiliza en esta fórmula es una presión promedio:

$$P_m = \frac{2}{3} * \left(\frac{P_1^3 - P_2^3}{P_1^2 - P_2^2}\right)$$

$$P_m^* = P_m - 14{,}7$$

P_m= Presión promedio del gas (presión absoluta), psia

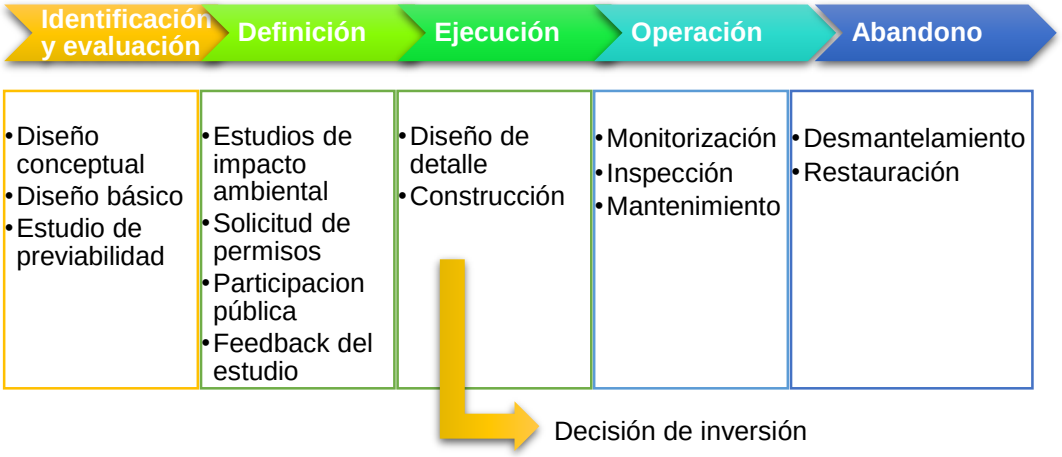
P_m^* = Presión promedio del gas (presión manométrica), psig

P_1= Presión de entrega, psia

P_2= Presión de salida, psia

2.2.6. Flujo de trabajo de un proyecto para transporte de CO_2.

Figura 10. Diseño en las fases de un proyecto.



La Figura 10 muestra un flujograma de las fases de un transporte de CO_2.

Identificación y evaluación, las principales actividades llevadas a cabo son:

- ✓ Definición cualitativa, incluyendo las motivaciones y las posibles fuentes de financiación.
- ✓ Definición de los parámetros básicos: fuentes de CO_2 utilizadas, cantidad y calidad del CO_2 transportado y lugar de almacenamiento. También se debe valorar la posibilidad de reutilizar ductos ya existentes o la posibilidad de conexión a una red de transporte ya existente.
- ✓ Establecer los requisitos de regulación, particularmente los relacionados con el CO_2.
- ✓ Establecer un primer trazado de ductos.
- ✓ Elaborar un plan de consulta pública.
- ✓ Contacto preliminar con las posibles fuentes de financiación.
- ✓ Establecer un diseño conceptual y un cálculo preliminar de costos.
- ✓ Elaborar un plan general de desarrollo.

Definición o diseño, se lleva a cabo si los resultados y conclusiones de la primera fase son lo suficientemente positivos como para incurrir en gastos adicionales que implica el desarrollo del proyecto. Las principales actividades llevadas a cabo son:

- ✓ Estudio de impacto ambiental: debe ser de acuerdo a la legislación y normativa existente, este estudio normalmente no incluye puntos distintos que su homólogo el gas natural, excepto en lo relacionado con el comportamiento del CO_2 en caso de que se libere a la atmósfera.
- ✓ Solicitud de permisos: de acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio de impacto ambiental se procede a la solicitud de los permisos iniciales. La duración de este proceso es diferente entre proyectos, dependiendo factores como la complejidad del proyecto, la existencia de regulación o la opinión pública entre otros.
- ✓ Participación pública: mientras que la participación pública es poco probable en esta etapa para proyectos de ductos de gas natural, en el caso del CO_2 sería recomendado contar con ello al iniciar el proceso.
- ✓ Feedback del estudio: un punto clave en la fase de definición del proyecto es retroalimentar el estudio con nueva información para lograr mayor precisión en el diseño del sistema de transporte y en la estimación de costos.

Es importante tener en cuenta que el diseño debe ajustarse tanto a las condiciones normales de operación como las condiciones extremas, con sus posibles rangos de caudales, presiones, temperaturas, composiciones y calidades del CO_2.

En un limitado número de casos, ductos ya existentes tienen la capacidad y localización apropiada para conectar fuentes de emisión y puntos de almacenamiento. Cuando la integridad del ducto es la apropiada, es posible reutilizar ductos de gas natural existentes para el caso del transporte de CO_2, verificando que se cumplan los códigos apropiados de diseño. Esta tarea puede reducir tanto los costos como los plazos de ejecución de las obras para instalar el sistema de transporte adecuado.

2.2.7. Normativa aplicable al diseño y construcción de ceoductos

Se listan a continuación las normas y códigos de diseño internacionales que pueden dar cobertura parcial al transporte de ceoductos:

- ✓ ASME B31.4 - 2012 - Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids.
- ✓ ASME B31.8 - 2007 - Gas Transmission and Distribution Piping Systems.
- ✓ SME B31.8S – 2010 - Managing System Integrity of Gas Pipelines.
- ✓ ISO 3183 – 2007 - Petroleum and natural gas industries – Steel pipe for pipeline transportation systems.
- ✓ ISO 16708 – 2006 - Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Reliability-based limit state methods.
- ✓ ISO 17776 – 2000 - Petroleum and natural gas industries - Offshore production installations - Guidelines on tools and techniques for hazard identification and risk assessment.
- ✓ NACE TM0192-2003 - Evaluating Electrometric Materials in Carbon Dioxide Compression Environments.
- ✓ NACE TM 0297-2008 - Effects of High-Temperature, High-Pressure Carbon Dioxide Decompression in Electrometric Materials.
- ✓ CSA Z662-2011 - Oil and Gas Pipeline Systems. Canadian Standard Association.

2.2.8. Selección del trazado

La selección del trazado debe tener en cuenta las fases de diseño, construcción, operación, mantenimiento y abandono del sistema de ductos de acuerdo a los estándares internacionales. Los factores que deben ser considerados de acuerdo a la norma internacional ISO-13623 (International Standard Organization, 2009) son:

- ✓ Seguridad de la población: tanto del personal trabajador como de cualquier persona cercana a la instalación: los ductos que transportan CO_2 deben evitar en su medida las áreas edificadas o de frecuente actividad humana.
- ✓ Protección del entorno y medioambiente: debe realizarse una evaluación de impacto ambiental teniendo en cuenta como mínimo: los trabajos temporales de construcción, y los trabajos de reparación y mantenimiento; la presencia de ductos a largo plazo; la posibilidad de escape del fluido.
- ✓ Protección de otros bienes y servicios: las instalaciones que puedan ser afectadas a lo largo de la ruta del ceoducto deben de ser identificadas y evaluadas, en colaboración con los propios operadores de dichas instalaciones.

- ✓ Protección de las actividades de terceros: las actividades desarrolladas por terceros a lo largo del trazado del ceoducto también deben de ser identificadas y evaluadas en colaboración con los mismos.
- ✓ Condiciones geotécnicas, hidrográficas y de corrosividad: deben de identificarse las condiciones geotécnicas e hidrográficas adversas para definir las medidas de mitigación. En situaciones donde las condiciones meteorológicas sean extremas, también deberá ser identificados y evaluados los potenciales agentes de riesgo.
- ✓ Requisitos de construcción, operación y mantenimiento: el trazado elegido debe de permitir el acceso para las tareas de construcción, monitorización y ensayos, operación y mantenimiento. También debe revisarse la disponibilidad de servicios públicos para estas labores.
- ✓ Exigencias locales o nacionales: se debe lograr la aprobación política en las diferentes áreas, revisando la normativa a nivel local y nacional.

Según el informe "CO_2 Pipeline Infrastructure" (IEAGHG & Global CCS Institute, 2014), más allá de la definición de la ruta o trazado de ductos y de la identificación de áreas potencialmente problemáticas, la mayor parte del trabajo de detalle se evalúa en fases posteriores del proyecto, que son:

- ✓ Minimizar la interferencia con las infraestructuras tanto construidas como proyectadas, evitando, en su posible medida, las áreas de población.
- ✓ Evitar las áreas ecológicas más sensibles y los lugares de interés arqueológico.
- ✓ Elegir un terreno estable para la construcción de tuberías.
- ✓ Seguir las posibles rutas de otras conducciones por ductos, facilitando la labor de obtener los permisos para su desarrollo.
- ✓ Evitar los cursos de ríos y los cruces con grandes vías en su posible medida.
- ✓ Evitar áreas destinadas a otras futuras labores incompatibles con el paso del ducto.
- ✓ Para los ceoductos es necesario establecer una jurisdicción específica y una regulación aplicable, si existen diferencias con respecto a ductos de gas natural.

2.2.9. Riesgos y fallas asociados al transporte por ceoductos

La naturaleza de los riesgos relacionados con los ceoductos depende en gran medida del comportamiento de la dispersión de la corriente de CO_2 en caso de una liberación a

la atmósfera (influenciado por su fase), así como de las características del lugar en el que se produzca dicho escape. El impacto potencial de ductos en caso de un escape de CO_2 depende en gran medida de factores como (ICF International, 2009):

- ✓ Distribución de la población en el entorno del ducto.
- ✓ Diámetro del ducto.
- ✓ Propiedades termodinámicas del CO_2 (incluida la temperatura y presión)
- ✓ Material de ductos (y su espesor).
- ✓ Opciones de mitigación de riesgos.
- ✓ Asunción de diferentes escenarios de falla incluyendo frecuencia de falla.
- ✓ Composición y fase de la corriente de CO_2.

Los principales factores y fenómenos objeto de estudio para minimizar el riesgo de fallas de un ceoducto son:

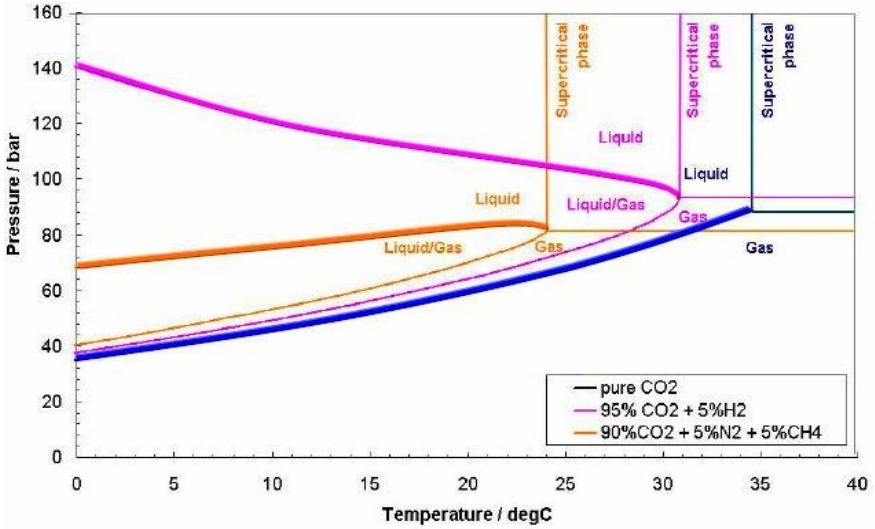
a) Propiedades del CO_2 con impurezas: las impurezas en la corriente de CO_2 (Tabla 6) afectan a las propiedades físicas del fluido, también modifica los requerimientos de compresión, afecta a la integridad del ceoducto y aumenta el perfil de peligrosidad. El contenido en impurezas de la corriente de CO_2 a transportar está influenciado directamente por el método de captura en la fuente de emisión de CO_2 (central térmica de carbón, central de ciclo combinado, etc.). La mayor pureza de CO_2 se consigue mediante post- combustión, mientras que la menor se produce mediante oxicombustión.

Tabla 6. Composiciones de la corriente de fluido según método de captura de CO_2.

Componente	Post-Combustión	Pre-Combustión	Oxicombustion
CO_2	>99 vol%	>95.6 vol%	>90 vol%
CH_4	<100 ppmv	<350 ppmv	
N_2	<0.17 ppmv	<0.6 ppmv	<7 vol%
H_2S	Trace	3.4 vol%	Trazas
C_{2+}	<100 ppmv	<0.01 vol%	-
CO	<10 ppmv	<0.4 vol%	Trazas
O_2	<0.01 vol%	Trazas	<3 vol%
NO_X	<50 ppmv	-	<0.25 vol%
SO_X	<10 ppmv	-	<0.25 vol%
Ar	Trazas	<0.05 vol%	<5 vol%

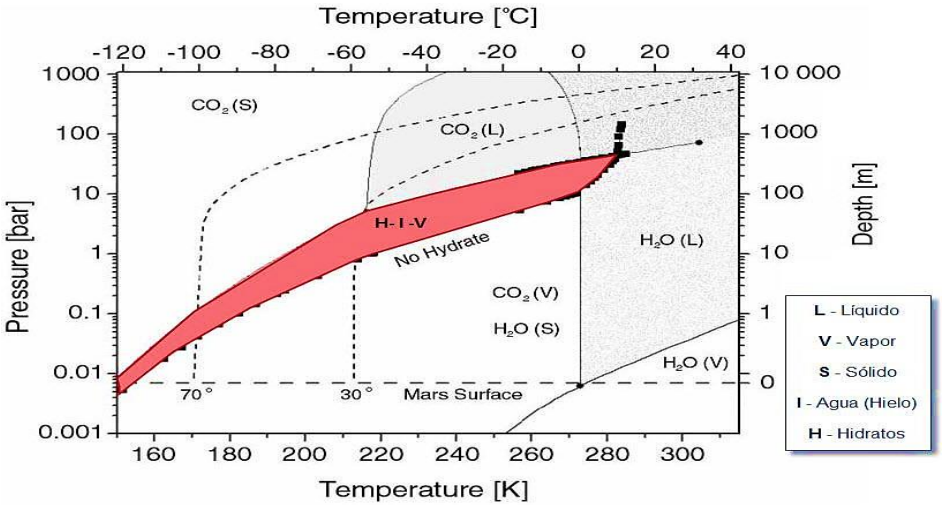
En función de la composición y pureza del CO_2, el comportamiento termodinámico del CO_2 es variable (Figura 11), afectando directamente a las condiciones presión-temperatura que permiten mantener el fluido en una sola fase.

Figura 11. Diagrama de fases según composición y pureza de la corriente de CO_2.



b) Formación de hidratos: en el diagrama de fases de hidratos de CO_2 (Figura 12), la zona coloreada representa las condiciones a las cuales el hidrato de CO_2 es estable junto con el CO_2 en estado gaseoso y el agua en estado sólido (hielo), como se puede observar, los rangos de presión en los que se produce esta estabilidad son muy amplios.

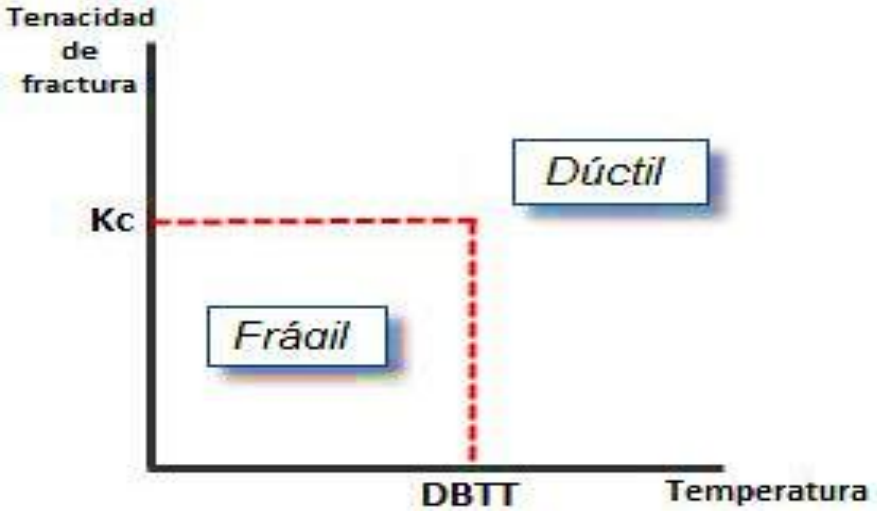
Figura 12. Diagrama de fases de hidrato de CO_2.



c) **Corrosión de la pared de ductos:** entre los principales componentes que aumentan el nivel de corrosión son: agua (H_2O), oxígeno (O_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el dióxido de azufre (SO_2). La experiencia de trabajo muestra que el CO_2 puro deshidratado y aquel que contiene agua disuelta muy por debajo de su límite de saturación no presentan corrosividad en los ductos de acero al carbono en las condiciones de operación.

d) **Propagación de fracturas:** las dos formas principales de fractura son: de tipo frágil y dúctiles, Figura 13. Dos parámetros fundamentales en el estudio del comportamiento de un material como es el acero al carbono son: la temperatura de transición dúctil/frágil (DBTT) y la tenacidad de fractura (capacidad de un material de resistir a la propagación de fracturas) caracterizada por el parámetro Kc. Si la temperatura se encuentra muy por debajo de la temperatura de transición dúctil/frágil, la resistencia a la fractura cae significantemente (en torno al 100% en el caso de los aceros al carbono) y comienza una fractura de tipo frágil cuyas consecuencias pueden representar una gran problemática.

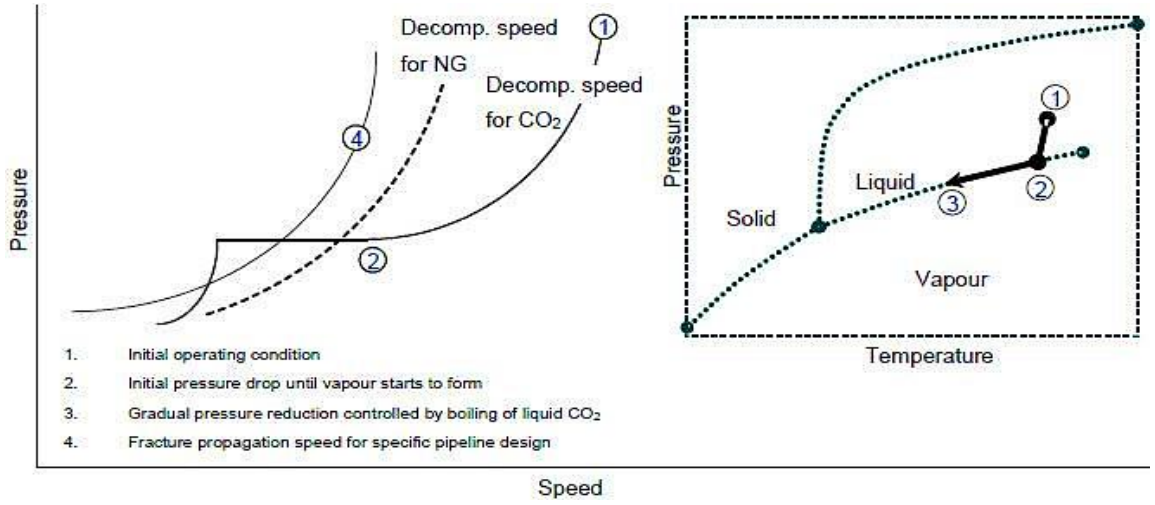
Figura 13. Grafica esquemática de la zona de transición dúctil-frágil.



Como puede observarse en la Figura 14, la particularidad relacionada con el CO_2 es su rápida velocidad de descompresión hasta la presión correspondiente a la línea líquido- vapor. Comparado con el gas natural, la velocidad de descompresión del CO_2 líquido es significantemente mayor. Sin embargo, cuando comienza a formarse

la fase vapor, la velocidad de descompresión cae significantemente, por debajo de los valores de velocidad de descompresión del gas natural.

Figura 14. Comparativa (CO_2-GN) de velocidades de despresurización y de propagación de las grietas.



La velocidad de descompresión se ve afectada por: la composición del CO_2, la presión de operación inicial y la temperatura de operación. Componentes con una temperatura crítica por debajo de la del CO_2, como es el caso del metano, el nitrógeno o el hidrógeno aumentan la dureza requerida para detener la propagación de fracturas de tipo dúctil. Altas presiones de operación aumentan la velocidad de descompresión y una alta temperatura de operación también aumenta la presión de saturación.

2.2.10. Diferencias del diseño de un gasoducto y ceoducto.

Los ceoductos son similares a los gasoductos, pueden alcanzar miles de kilómetros y cruzar montañas, ciudades y océanos. Sin embargo, las diferencias entre el gasoducto y un ceoducto son las siguientes: medio de transmisión, operación y resistencia del material del ducto (Tabla 7).

El CO_2 es similar al gas natural en color, olor y forma de transporte, pero el CO_2 no es tóxico ni inflamable. Cuando un ducto tiene una fuga, se difunde mucho más lentamente que el gas natural, ya que es más pesado que el aire y se acumula en áreas bajas. Aunque la frecuencia de fallas por fuga de ductos de CO_2 es baja, sus leyes de fuga y difusión merecen un mayor estudio.

Tabla 7. Especificaciones técnicas de diseño.

Terreno y trazado	Conducción	Instalaciones auxiliares
Topografía	Calidad del acero	Estaciones de Protección Catódica (EPC)
Geología y geotécnica	Diámetro	Estaciones de Regulación y Medida (ERM)
Hidrología	Revestimiento	Estaciones de compresión
Impacto ambiental	Profundidad de enterramiento	Trampas de rascadores
Métodos constructivos	Protección catódica	Válvulas de derivación e interceptación
Ordenación del territorio	Protección, cruces y zonas especiales	Telemedida y telemando
Expropiaciones		Acometidas eléctricas

Las propiedades físicas del CO_2 son diferentes a las del gas natural, en ese sentido, su forma de transporte se ve afectada por la temperatura, la presión y las impurezas, por lo que es elemental tener una transformación de fase en el proceso de transporte. En el proceso de transporte de gas natural se debe prestar especial atención a la temperatura y presión para controlar la formación de hidratos. Para el CO_2, también se debe considerar el límite de impurezas.

Los ceoductos son más propensas a sufrir fracturas dúctiles, debido al transporte a baja temperatura y a las ondas de descompresión, las propiedades del material de los ductos de CO_2 tienen mayores requisitos. El CO_2 puede ser transportado en un estado supercrítico, mientras que a diferencia del gas natural la temperatura crítica es en torno a -85 °C, esto da lugar a un comportamiento distinto de los materiales. Aunque la presión crítica de ambos gases sea semejante, debido a la presencia de las impurezas en el CO_2 hace que haya una serie de variaciones que provoque que el diseño y la elección de los materiales sea diferente.

La densidad del CO_2, en las condiciones óptimas de transporte, es similar a la de un líquido: entre 0,7 y 0,8 t/m^3. Esta característica hace que la elección del trazado idóneo sea más compleja, pues se deben tener en cuenta las variaciones de presión producidas en el flujo de CO_2 a consecuencia de los cambios de altitud que pueden tener una elevada influencia si se alcanzan condiciones de presión que induzcan la presencia de flujo bifásico. Esta condición no se produce en el transporte del gas natural.

Tabla 8. Diferencias principales entre CO_2 y gas natural.

Estado Físico a 20 °C y 100 bar	CO_2	Gas Natural
Estado Físico a 165 °C y 1.013 bar	Solido	Liquido
Masa molecular (g/mol)	44	16
Temp. Punto triple (°C)	-56.6 (ebullición)	-182.5 (fusión)
Presión punto tripe (bar)	5.18	0.117
Temp. critica (°C)	30	≈ - 85
Presión critica (bar)	73.84	≈ 60
Densidad relativa del gas (Aire = 1)	1.52	0.55
Coeficiente Jhoule Thompson (20 °C y 100 bar)	0.45 (estado líquido SC)	≈ 0.07 (estado gas)
Inflamabilidad (% vol. en aire)	No inflamable	Inflamable (LII-LSI entre 5 - y 15%)
Solubilidad en agua a 15 °C (mg/l)	2000	0.054
Color	Incoloro	Incoloro
Olor	Inodoro	Inodoro

Tabla 9. Condiciones adecuadas del transporte de CO_2 y gas natural.

Medios de transporte	Ceoducto		Gasoducto	
	Estado supercrítico (>P° critica)	Estado liquido	Estado crítico (P° alta)	Estado liquido
Ductos onshore y offshore	x		x	
Ferrocarril		x		x
Camión cisterna		x		x
Barco		x		x

2.3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

El transporte por ductos de gas natural y CO_2, se viene realizando desde hace muchas décadas, donde las Tecnologías de transporte de gas natural abandonadas fueron utilizadas para el transporte de CO_2, previo cumplimiento de normativas.

Los medios de transporte de estos componentes se realizan por sistemas de transporte terrestre y marítimo, sin embargo, para garantizar la seguridad y ciertos parámetros de los mismos, para grandes distancias realizan a través de ductos. Antes del transporte deben cumplir con ciertas especificaciones técnicas de calidad a efectos de evitar la corrosión rápida del ducto.

El CO_2 es uno de los principales gases de efecto invernadero (GEI) que causan el calentamiento global, derivado principalmente de la producción industrial y la generación

de energía. Actualmente, muchos países, empresas y organismos internacionales se encuentran preocupados por el incremento de calentamiento global, y están comprometidos con la investigación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCUS), buscando reducir el calentamiento global siendo la misma una de las soluciones al problema.

Para el transporte del gas natural, inicialmente se debe extraer el gas natural desde el subsuelo hasta superficie, mientras que el CO_2 deberá ser capturado desde las centrales eléctricas y termoeléctricas. Posteriormente deberán ser acondicionados o tratados para eliminar o disminuir la concentración de compuestos indeseables y cumplir con especificaciones técnicas de calidad para ser transportados.

El tratamiento para el gas natural, consiste de tres procesos: endulzamiento, se hace con el fin de remover el H_2S y el CO_2 del gas natural, debido a que estos compuestos son gases que pueden ocasionar problemas en el manejo y procesamiento del gas, así como también problemas de corrosión, olores perniciosos, emisiones de compuestos causantes de lluvia ácida, entre otros. El segundo proceso de deshidratación, se realiza para eliminar el vapor de agua que contiene el gas, el que puede producir corrosión y formar hidratos de hidrocarburos (a temperaturas cercanas a la de ambiente y a presiones altas) obstruyendo las restricciones presentes en los gasoductos, el último proceso de ajuste de punto de rocío, es necesario para disminuir el contenido de hidrocarburos pesados.

Mientras que el transporte de CO_2, comienza con el acondicionamiento de una corriente rica en CO_2 que se recibe del proceso de captura y finaliza con la inyección en un sitio de almacenamiento, los principales procesos que se toman en los sistemas de transporte de CO_2 por ductos son: acondicionamiento del CO_2 concentrado capturado desde la fuente, que incluye la purificación del CO_2 a la composición deseada y compresión al nivel de presión requerido; transporte por ductos, que puede incluir recompresión intermedia a través de estaciones de refuerzo de compresores, si es necesario.
El diseño de gasoductos y ceoductos debe cumplir una serie de requisitos técnicos de transporte entre ellos los fisicoquímicos, condiciones de trazado y seguridad y medio ambiente, se debe considerar los trazados de líneas en diferentes zonas como: carreteras, pobladas, valles entre otros.

La presencia de impurezas en ductos, tiene un gran impacto en las propiedades físicas del gas natural y CO_2 transportado, afecta directamente en el diseño de ductos, la potencia del compresor, la distancia de recompresión y la capacidad del ducto, y también podría tener implicaciones para la prevención de la propagación de fracturas.

Las propiedades determinan el comportamiento frente a la corrosión y, por lo tanto, tendrán implicaciones en el diseño del ducto, como en la selección de materiales y revestimientos, en la selección de materiales utilizados para sellos, juntas, revestimientos internos y otros aspectos de seguridad o integridad - componentes críticos, influyendo también en los costos de transporte.

El transporte por ductos de gas natural y CO_2 son similares, sin embargo, existen diferencias importantes que son: medio de transmisión, operación y resistencia del material del ducto.

CAPÍTULO III CONCLUSIONES

- ✓ Los sistemas de transporte del gas natural y CO_2 deben cumplir requisitos técnicos de diseño y construcción que garanticen una correcta operación y mantenimiento con el fin de precautelar las instalaciones en superficie. Las tecnologías CCS son los precursores para un incremento a nivel mundial de la readecuación de los gasoductos a ceoductos.
- ✓ El gas natural y CO_2 a ser transportados deben cumplir especificaciones técnicas de calidad imprescindible, a efectos de evitar corrosión en los ductos y generar costos elevados por la adquisición de materiales. Estas especificaciones hacen referencia a la densidad, viscosidad y fundamentalmente el estado crítico del CO_2, misma que dependen de la presión, temperatura y volumen. Un correcto control de estas propiedades garantizará que las operaciones tanto de gasoductos y ceoductos se encuentren en el marco de la normativa técnica y medioambiental vigente.
- ✓ El diseño de gasoductos y ceoductos deben cumplir una serie de requisitos técnicos tanto nacionales como internacionales que garanticen resistencias técnicas a las condiciones tanto interna como externa reinante durante el transporte de gas natural y CO_2. Además, la seguridad en el transporte es imprescindible para el resguardo de la salud humana, materiales y medio ambiente.
- ✓ Se ha evidenciado múltiples similitudes y diferencias que gobiernan el transporte de estos gases por ductos. En una primera instancia los ceoductos fueron diseñados en base al conocimiento de la industria petrolera, sin embargo, en la actualidad se vienen desarrollando fórmulas, ecuaciones e investigaciones para comprender perfectamente el flujo CO_2 por ductos y su reducción en la atmósfera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cillero Florén, A., Gil Jiménez, J. M., Gómez Pérez, M., Larrea Quintana, G., Llavona Fernández, I., Martín Rodríguez, J., Martínez Caravaca, M. D., Montero Puñal, I., Ossó, J. O., Riesco García, J. M., Rivera Ysasi-Ysasmendi, J., Rodríguez Andrés, M., Rodríguez Muñoz, P., Toscano Benavides, L., & Vega, L. F. (2013). Transporte de CO2: estado del arte, alternativas y retos. www.pteco2.es

Global CCS Institute. (2022). *Informe 2022 del Global CCS Institute. Global CCS Institute.* https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2023/03/GCCSI_Global-Report-2022_PDF_FINAL-01-03-23.pdf

Gonzáles Castillo, M. (2019). *Captura, transporte y almacenamiento del CO2 antropogénico (CCS) para la reducción de gases de efecto invernadero: efecto de las impurezas SO2 y H2.* Facultad de Ciencias, Universidad Zaragoza.

Hamedi, M. Esmaeilian, G. (2011). *Optimización en la Planificación de Redes de Gas Natural–Operaciones y Gestión Logística.* https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/electric-power-transmission-networks

Hernández Díaz, A. (2014). *Estudio Técnico-Económico del Criterio Distancia Foco Emisor y Almacen de CO2. Aplicacion a un caso de Estudio en la Cuenca del Duero.* Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de Madrid.

Hongfang Lu, Xin Ma, Kun Huang, Lingdi Fu, Mohammadamin Azimi. (2020). Carbon dioxide transport via pipelines: A systematic review. Journal of Cleaner Production, 266. ISSN 0959-6526. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121994. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620320412)

Nuestro mundo en datos. (2023). Emisiones de CO_2 y gases de efecto invernadero. https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions

Pérez Vega, R. (2016). *Captura de CO2 en la Combustión Carbón con Transportadores Solidos de Oxígenos.* Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC) de Zaragoza.

Plataforma Tecnológica Española del CO2 [PTECO2]. (2013). *Transporte de CO2: estado del arte, alternativas y retos*. www.pteco2.es

Yampa Quispe, M. (2023). D*iseño red primaria de gas natural para el municipio de tiwuanacu de la provincia ingavi departamento de la paz.* [Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería Petrolera]. Universidad Mayor de San Andrés.