



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN YACIMIENTOS DE HIDRATOS DE METANO CON DIAGRAMA DE KATZ-GAS

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO PETROLERO**

P R E S E N T A N

HUGO APARICIO MIRANDA

JAMILETH TRUJILLO GUERRERO

ASESOR: M.G. JOSÉ DE JESÚS RUIZ ZAMORA

MISANTLA, VERACRUZ

MARZO 2024



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

FECHA: 06 DE MARZO DEL 2024
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por medio de la presente hago constar que el (la) C:

APARICIO MIRANDA HUGO

Pasante de la carrera de **INGENIERÍA PETROLERA** con no. de Control **192T0751** ha cumplido satisfactoriamente con lo estipulado por el **Manual de Procedimientos para la Obtención del Título Profesional de Licenciatura** bajo la opción Titulación Integral (TESIS PROFESIONAL)

Por tal motivo se **AUTORIZA** la impresión del tema titulado:

“ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN YACIMIENTOS DE HIDRATOS DE METANO CON DIAGRAMA DE KATZ-GAS”

Dándose un plazo no mayor de un mes de la expedición de la presente a la solicitud del Acto de Recepción para la obtención del Título Profesional.

ATENTAMENTE

LIC. JANETH LÓPEZ CARDEÑA
COORDINADORA DE ESTUDIOS PROFESIONALES



COORDINACIÓN DE
ESTUDIOS PROFESIONALES

Archivo.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

FECHA: 06 DE MARZO DEL 2024
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por medio de la presente hago constar que el (la) C:

TRUJILLO GUERRERO JAMILETH

Pasante de la carrera de **INGENIERÍA PETROLERA** con no. de Control **192T0784** ha cumplido satisfactoriamente con lo estipulado por el **Manual de Procedimientos para la Obtención del Título Profesional de Licenciatura** bajo la opción **Titulación Integral (TESIS PROFESIONAL)**

Por tal motivo se **AUTORIZA** la impresión del tema titulado:

“ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN YACIMIENTOS DE HIDRATOS DE METANO CON DIAGRAMA DE KATZ-GAS”

Dándose un plazo no mayor de un mes de la expedición de la presente a la solicitud del Acto de Recepción para la obtención del Título Profesional.

ATENTAMENTE

LIC. JANETH LÓPEZ CARDEÑA
COORDINADORA DE ESTUDIOS PROFESIONALES



Archivo.

Agradecimientos y Dedicatoria

A **Dios**; por tu guía constante e inagotable amor. Por sostenernos en cada paso del camino, por ser inspiración en la búsqueda del conocimiento y por fortalecer nuestro vínculo como compañeros. Este logro es un testimonio de gracia, bondad e infinita misericordia. Con humildad y alegría, dedicamos este logro a ti, nuestro fiel y eterno Señor. Amen.

“Dios les da nuevas fuerzas a los débiles y cansados. Los jóvenes se cansan por más fuertes que sean, pero los que confían en Dios siempre tendrán nuevas fuerzas. Podrán volar como las águilas, podrán caminar sin cansarse y correr sin fatigarse.”

"Así brille también la luz de ustedes delante de los demás, para que ellos vean las buenas obras que ustedes hacen y alaben al Padre que está en el cielo."

- Mateo 5:16

- Isaías 40:29-31

Agradezco a **mis padres** que siempre han estado apoyándome, cuando sentía que no podía ellos alentándome a seguir adelante. agradezco cada palabra de aliento y cada esfuerzo que han hecho para llegar a este gran paso en mi vida, gracias a ellos he logrado cada paso de mi vida; por su motivación, por su amor, por cada apoyo económico para salir mi carrera, solo queda decir muchas gracias, papás por nunca soltarme y darme su amor en cada momento de mi vida. Mis padres son un claro ejemplo del querer es poder, gracias a ellos antes de mi nombre habrá un Ing., los amo demasiado.

A **mis abuelos**; por su sabiduría, paciencia y apoyo incondicional que han sido mi fortaleza en los momentos de desafío y crecimiento. Desde el primer día hasta este momento de culminación, han sido mi ejemplo de sacrificio y bondad.

Su inmensa fe en mí y su esfuerzo han hecho posible este logro. Por brindarme un hogar cálido y seguro durante toda mi carrera, por invertir en mi educación y en mi futuro. Cada logro, cada desafío superado, lleva impreso su amor y dedicación.

A **mis hermanos**, gracias a ellos he culminado mi carrera que ha sido un logro para ellos también, porque gracias a ellos siempre estuve motivada a seguir adelante, cada llamada que recibía de ellos para saber cómo me iba en mis estudios y cada apoyo económico que me brindaron para culminar mi carrera, quiero agradecer en especial a mi hermana **Celia**, gracias a ella he llegado tan lejos y lograr quién soy, ella ha sido mi mayor motivación de salir adelante como persona solo queda decirle muchas gracias por estar siempre para mí.

A quienes me dieron la vida y la razón de vivirla, **madre, padre y hermana**, quienes han demostrado ser la mayor de mis fortalezas, mis debilidades y a quienes les debo todo mi ser, su confianza, admiración y respeto es algo que muy pocos hijos somos capaces de recibir. Este triunfo es nuestro y es por nosotros que mis logros serán siempre para ustedes.

Los Amo.

A **mis familiares**, gracias por sus palabras de motivación que recibía por parte de ellos, quiero agradecer en especial a mi **tío Cristóbal** por brindarme su casa y dejarme bonitas palabras de aliento para terminar mi carrera, gracias a mi **Tía Alberta** por brindarme hospedaje y por ser una segunda madre para mí, gracias a ella por brindarme su amor y motivarme cada día de mi vida como estudiante. Gracias, tíos por mucho y un fuerte abrazo a mi **Tío Cristóbal** hasta el cielo.

A **Karla Bernabé, Jacquelin Ramírez** y al **Psic. Alejandro Díaz**, fuente de motivación, ejemplo y una razón clave de superación personal y profesional.

A mi leal compañero de once libras, que no me abandonó ni un instante desde mi llegada a lo desconocido, la terca princesa güera y mi pequeño ángel escandaloso.

Lucas, Tesa y Rusky,
donde quiera que te encuentres, mi niño.

Al **Maestro José de Jesús**; expresando nuestro más sincero agradecimiento por su invaluable orientación y apoyo durante nuestro tiempo en esta etapa de nuestra vida. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales en nuestro desarrollo académico y personal. Gracias por inspirarnos, motivarnos y creer en nosotros. Su influencia ha dejado una huella imborrable en nuestras vidas y estamos profundamente agradecidos por haber tenido el privilegio de contar con usted como nuestro asesor.

A **Hugo**; Un gran amigo y compañero de tesis, hemos enfrentado muchos obstáculos, pero los hemos sabido resolver, gracias a Hugo por tu sabiduría y tu amistad que me brindaste, sé que no ha sido nada fácil llegar hasta este punto de nuestras vidas, pero ten por seguro que siempre puedes apoyarte de mí porque eres un gran amigo y compañero. Gracias por esa motivación que siempre me brindaste porque esas desveladas tendrán su recompensa, ahora ya seremos unos ingenieros petroleros que siempre estaremos para apoyarnos.

A **Jamileth**; quien, a través de los desafíos y los momentos de incertidumbre, tu presencia ha sido un faro de luz que me ha guiado hacia la meta. Tu inteligencia, tu amabilidad y tu compromiso han hecho de esta experiencia no solo un logro académico, sino también un recuerdo imborrable en mi corazón.

Gracias por tu trabajo arduo, por tus palabras de aliento y por tu constante inspiración. Este logro no sería posible sin ti. Que este pequeño gesto de gratitud refleje la inmensidad de mi aprecio y admiración hacia ti.

Alfredo e Itahi, nuestros amigos del alma que siempre han estado para nosotros en las buenas y las malas han sido una amistad sincera dentro y fuera de la carrera, han sido un gran apoyo emocional y moral, ejemplo de superación e inspiración en la adversidad, por mayores y por menores, los únicos dignos del mayor respeto y sinceridad.

Karla y Mariam; Gracias por su infinita amistad, gracias por esas risas en el salón y ese apoyo incondicional que recibí por parte de ustedes.

A **Sergio, Randú y Danno**, por quienes no pediría nada y soy capaz de darlo todo, más que un impulso, una razón y motivación de confiar cuando nadie lo hace.

Resumen

Este proyecto de investigación se enfoca en el análisis del fracturamiento hidráulico en yacimientos de hidratos de metano como una alternativa no convencional para la extracción en aguas profundas del Golfo de México. A lo largo de la investigación, se han cumplido los objetivos establecidos, abordando sistemáticamente el estudio de la metodología aplicada en la explotación de hidratos de metano. Se ha identificado la diversidad de hidratos, analizado la naturaleza de los yacimientos no convencionales en el Golfo, ubicado geográficamente los yacimientos, y desarrollado un código en Python basado en la ecuación de Katz-Gas para determinar la temperatura del yacimiento.

El enfoque técnico mediante el código en Python se revela como un componente esencial para la consecución de los objetivos, permitiendo determinar la temperatura del yacimiento, factor crítico en la formación de hidratos. Los resultados obtenidos a través de este enfoque técnico respaldan la hipótesis inicial, indicando la viabilidad del fracturamiento hidráulico como una herramienta efectiva para superar los desafíos asociados con la fragilidad de los cristales de hidratos de metano. La convergencia de los resultados obtenidos proporciona una perspectiva integral sobre la viabilidad de este enfoque en aguas profundas del Golfo de México. La temperatura del yacimiento, evaluada mediante el código en Python, se posiciona como un indicador clave para la viabilidad del fracturamiento hidráulico. Estos hallazgos tienen implicaciones significativas para la industria energética, ofreciendo la posibilidad de diversificar las fuentes de energía y contribuir a la seguridad energética a largo plazo mediante la implementación estratégica del fracturamiento hidráulico.

Abstract

This research project focuses on the analysis of hydraulic fracturing in methane hydrate reservoirs as an unconventional alternative for deepwater extraction in the Gulf of Mexico. Throughout the research, the established objectives have been met, systematically addressing the study of the methodology applied in methane hydrate exploitation. The diversity of hydrates has been identified, the nature of unconventional reservoirs in the Gulf has been analyzed, the geographical location of the reservoirs has been determined, and a Python code based on the Katz-Gas equation has been developed to determine the reservoir temperature.

The technical approach through the Python code proves to be an essential component for achieving the objectives, allowing for the determination of reservoir temperature, a critical factor in hydrate formation. The results obtained through this technical approach support the initial hypothesis, indicating the feasibility of hydraulic fracturing as an effective tool to overcome challenges associated with the fragility of methane hydrate crystals.

The convergence of the obtained results provides a comprehensive perspective on the feasibility of this approach in deep waters of the Gulf of Mexico. The reservoir temperature, evaluated through the Python code, emerges as a key indicator for the viability of hydraulic fracturing. These findings have significant implications for the energy industry, offering the possibility of diversifying energy sources and contributing to long-term energy security through the strategic implementation of hydraulic fracturing.

Índice de Contenido

Agradecimientos y Dedicatoria	i
Resumen	iii
Abstract	iv
Índice de Contenido	v
Introducción	1
Capítulo I. Generalidades del proyecto	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Justificación.....	5
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
1.5. Hipótesis.....	6
1.6. Alcances y limitaciones.....	6
Capítulo II. Marco teórico	8
2.1. Gas natural.....	8
2.2. Metano.....	8
2.3. Hidratos	9
2.4. Estructura de los hidratos	9
2.4.1. Estructura tipo I.....	9
2.4.2. Estructura tipo II.....	10
2.4.3. Estructura tipo H	11
2.5. Hidratos de metano.....	11
2.6. Yacimiento no convencional	12

2.6.1. Características de los yacimientos no convencionales	12
2.6.2. Tipos de porosidad	13
2.6.3. Permeabilidad.....	14
2.6.4. Tipos de permeabilidad	15
2.7. Fracturamiento hidráulico	16
2.7.1. Etapas del fracturamiento hidráulico.....	16
2.7.2. Clasificación y tratamiento de componentes.....	18
2.7.3. Fracturamiento hidráulico uso intensivo en campos de gas	19
2.7.4. El impacto ambiental del fracturamiento hidráulico	20
2.7.5. Fluido fracturante	23
2.8. Yacimientos de hidratos de gas en el Golfo de México	24
2.9. Estimulación térmica.....	25
2.9.1. Inyección de fluidos calientes	25
2.9.2. Inyección de agua caliente	26
2.9.3. Inyección Cíclica.....	26
2.9.4. Inyección Continua	27
2.9.4. Inyección de vapor	27
2.9.5. Inyección Cíclica de Vapor	27
2.9.6. Inyección Continua de Vapor.....	28
2.9.7. Generación de calor In-Situ.....	28
2.9.8. Método de calentamiento electromagnético.....	28
2.9.9. Método de generación catalítica de calor	30
2.9.10. Generación catalítica de calor dentro del yacimiento de hidratos.....	30
2.10. Comportamiento de los hidratos de metano	31
2.10.1 Estabilidad de los hidratos de metano	33

2.11. Estimaciones de los recursos mundiales de metano en los hidratos de gas	34
2.12. Python.....	35
2.12.1. Antecedentes de Python	35
2.12.2. Librería Estándar	35
2.12.3. Herramientas de Python	36
2.13. Geometría de la fractura.....	37
2.13.1. Modelos en dos dimensiones (2D)	37
2.14. Modelo en tres dimensiones (3D)	38
2.15. Ubicación de Hidratos de Metano.....	39
2.15.1 Exploración y determinación de los hidratos de metano.....	39
2.15.2 Ubicación de reservas de hidratos de metano	40
2.15.3 Formación Wilcox.....	40
2.16. Consideraciones geológicas en el estudio de los hidratos de metano	42
2.16.1. Trampas estructurales.....	43
2.16.2. Trampas estratigráficas	43
2.16.3. Trampas mixtas	43
2.17. Ejemplos de hidratos de metano a nivel mundial.....	44
2.18. Diagrama de Katz-Gas	44
2.18.1. Modelos independientes de la gravedad específica.....	45
Capítulo III. Metodología.....	47
3.1. Fórmula y constantes.....	48
3.2. Desarrollo del código	49
Capítulo IV. Resultados	51
4.1. Objetivo I. Identificación de los tipos de hidratos presentes en distintos tipos de yacimientos no convencionales	51

4.2. Objetivo II. Comprensión de la función e impacto del fracturamiento hidráulico en el ecosistema y en la industria.....	52
4.3. Objetivo III. Análisis del comportamiento y la naturaleza de los yacimientos no convencionales en aguas profundas del golfo de México.	54
4.3.1. Selección del fluido de fracturamiento por medio de tabla comparativa.....	54
4.4. Objetivo IV. Identificación de la ubicación de los distintos yacimientos de hidratos de metano en el Golfo de México.	55
4.5. Objetivo V. Creación de un código para facilitar los cálculos que pueden determinar la presencia de hidratos de metano.....	57
Conclusiones	60
Recomendaciones.....	62
Referencias	64

Índice de Figuras

Figura 2.1. Estructura de hidrato tipo I.	10
Figura 2.2. Estructura de hidrato tipo II.	11
Figura 2.3. Estructura de hidrato tipo H.	11
Figura 2.4. Definición de permeabilidad.....	15
Figura 2.5. Representación de procedimiento de fracturamiento hidráulico.	17
Figura 2.6. Número de pozos con fracturamiento hidráulico y ubicación.	20
Figura 2.7. Mapa de las localizaciones de hidratos de gas en sedimentos en tierra.....	24
Figura 2.8. Inyección Térmica	25
Figura 2.9. Inyección Cíclica	26
Figura 2.10. Inyección Cíclica	27
Figura 2.11. Inyección Continua	27
Figura 2.12. Calentamiento electromagnético.....	29

Figura 2.13. Diagrama de Aplicaciones de Procesos Catalíticos	31
Figura 2.14. Comportamiento de los hidratos de metano.	33
Figura 2.15. El metano atrapado en los fondos marinos	34
Figura 2.16. Modelo 2D PKN	38
Figura 2.17. Modelo 2D KGD	38
Figura 2.18. Modelo 3D	39
Figura 2.19. Columna estratigráfica compuesta del área Arcabuz–Culebra.	41
Figura 2.20. Mapa de Boom Energético	44
Figura 2.21. Representación de diferentes compuestos en comportamiento de formación de hidratos en diagrama de Katz-Gas	46
Figura 4.1. Ficha técnica Pozo Nobilis-101	56
Figura 4.2. Ubicación Teca-1	56
Figura 4.3. Resultado gráfico del código en representación de la temperatura de formación de hidratos	59

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Relación entre tipos de permeabilidades	16
Tabla 3.1. Constantes de la fórmula de Katz-Gas	49
Tabla 4.1. Descripción de características de los diferentes tipos de hidratos	51
Tabla 4.2. Matriz de impacto al ecosistema y en la industria.	52
Tabla 4.3 Tabla Comparativa de Selección de Fluido de Fracturamiento	55

Índice de Fórmulas

Fórmula 2.1. Fórmula de Katz-Gas aplicada para el metano	45
Fórmula 3.1. Diagrama de KATZ-GAS	48

Introducción

El aprovechamiento de recursos energéticos no convencionales se ha convertido en una prioridad estratégica en la búsqueda de fuentes sostenibles y eficientes para cubrir las crecientes demandas energéticas a nivel global. En este contexto, los hidratos de metano, formaciones de hielo cristalino que encapsulan moléculas de gas, han emergido como una potencial fuente de energía en el Golfo de México. Sin embargo, su explotación presenta desafíos significativos, particularmente en yacimientos no convencionales, donde la aplicación del fracturamiento hidráulico se ha planteado como una posible solución.

Este trabajo se propone analizar de manera exhaustiva la metodología aplicada en la explotación de hidratos de metano en el Golfo de México, con un enfoque especial en los yacimientos no convencionales. El objetivo general es identificar el comportamiento de estos hidratos al ser sometidos al fracturamiento hidráulico, considerando aspectos geológicos y ambientales.

Para alcanzar este objetivo, se han delineado varios objetivos específicos. En primer lugar, se busca identificar los tipos de hidratos presentes en diferentes yacimientos no convencionales, entendiendo la diversidad de estas formaciones en el Golfo de México. A su vez, se pretende comprender la función e impacto del fracturamiento hidráulico en el ecosistema y en la industria, abordando sus consecuencias tanto a nivel ambiental como industrial.

El análisis se extenderá a la naturaleza y comportamiento de los yacimientos no convencionales en aguas profundas del Golfo de México, explorando las complejidades geológicas y operativas asociadas a estas ubicaciones. Asimismo, se persigue la identificación precisa de la ubicación de los yacimientos de hidratos de metano en la región, permitiendo una comprensión detallada de la distribución de este recurso.

Adicionalmente, se plantea la necesidad de determinar un código que indique la presencia de hidratos de metano en yacimientos no convencionales en aguas profundas del Golfo de México. Este código proporcionará una herramienta práctica para evaluar la viabilidad de la extracción en diferentes ubicaciones.

Capítulo I. Generalidades del proyecto

1.1. Antecedentes

- **"Manejo De Agua En Un Fracturamiento Hidráulico En Yacimientos No Convencionales De Lutitas" realizado por Carlos Luna G. de la Universidad Nacional Autónoma de México en noviembre de 2014.**

El resumen del estudio indica que el fracturamiento hidráulico se utiliza para crear grietas en formaciones subterráneas y aumentar la conductividad de los yacimientos de hidrocarburos. Se emplea un fluido a presión, bombas para generar esa presión, un agente apuntalante para mantener abiertas las grietas y aditivos para mejorar la eficiencia del proceso.

Debido a la gran cantidad de agua requerida para el fracturamiento hidráulico, es necesario contar con un plan de manejo del agua. Este plan busca reducir la necesidad de suministro de agua y ahorrar agua a través de la reutilización o el reciclaje.

Entre los aspectos a considerar en el manejo del agua se encuentran la fuente de suministro, transporte, almacenamiento, tratamiento, disposición final, regulaciones ambientales y el impacto en la comunidad local.

- **“Fracturamiento Hidráulico Aplicado A Yacimientos No Convencionales”, Lady Pamela Hidalgo B. Universidad Estatal Península De Santa Elena Facultad De Ciencias De La Ingeniería Carrera De Ingeniería En Petróleo.**

El trabajo abordó la creciente demanda de energía y la búsqueda de fuentes de abastecimiento que pudieran satisfacerla, generando así un interés destacado en los recursos de hidrocarburos en sistemas no convencionales. Los resultados obtenidos revelaron que el fracturamiento hidráulico emergió como un elemento fundamental para la extracción de gas natural en dos yacimientos no convencionales de shale gas.

Se concluyó que la utilización del gas natural en estos yacimientos tomó una dirección significativa gracias a la abundancia del recurso, destacando su relevancia como el combustible fósil más limpio en la generación de energía.

- **“Hidratos de Gas”, Edgar Parra. Marzo de 2004.**

Los hidratos de gas fueron considerados a nivel mundial como una posible fuente de energía, ya que representaban una importante reserva energética que supera notablemente las reservas

conocidas de petróleo, gas natural y carbón en conjunto. Estos hidratos se encontraban en cantidades que literalmente duplicaban las mencionadas reservas.

Se identificaron numerosos ambientes en el mundo con condiciones propicias para la formación de hidratos de gas, desde regiones árticas hasta antárticas, donde las temperaturas permanentemente bajo el punto de congelación, o "permafrost", favorecen su formación. Ejemplos de estos lugares incluían Alaska, el norte de Canadá y Siberia.

Además, se encontraron hidratos de gas en el margen continental externo, tanto en sedimentos del fondo marino como en el subsuelo marino del talud y la elevación continental. Esto ampliaba el potencial de extracción de esta valiosa fuente de energía.

- **“Estudio De Métodos De Explotación De Yacimientos De Hidratos De Gas Como Futuro Uso De Recurso Energético”, Fabian Patricio Osorio Ch. Universidad Estatal Península De Santa Elena Facultad De Ciencias De La Ingeniería Carrera De Ingeniería En Petróleo – 28 de septiembre de 2020.**

Los hidratos de gas son compuestos cristalinos que atrapan una gran cantidad de metano dentro de una estructura de jaula formada por agua. Estos sólidos se forman en condiciones de bajas temperaturas y altas presiones y se encuentran tanto en regiones de permafrost, como en suelos congelados, como en áreas marinas.

Se estima que las reservas mundiales de metano en los hidratos de gas podrían duplicar las cantidades de hidrocarburos conocidas en la Tierra. Por lo tanto, es crucial comprender los métodos de explotación disponibles para su futura aplicación en la producción de gas natural.

Entre las técnicas estudiadas se incluye la estimulación térmica, que implica elevar la temperatura por encima del punto de estabilidad del hidrato para liberar el metano atrapado. También se investiga la técnica de inyección de inhibidores, que se utiliza junto con el método de despresurización en situaciones prácticas.

- **“Hielo Inflamable”, Erwin Suess. Investigación y Ciencia – febrero 2000.**

Los hidratos de metano, cristales de hielo cargados de gas, presentes en el subsuelo marino, albergan una cantidad de energía superior a la de todas las reservas mundiales de crudo combinadas. Sin embargo, estos depósitos son extremadamente delicados y la liberación de gas podría intensificar el calentamiento global de la atmósfera.

- **“Hidratos de Gas en Química Sostenible”, Hassanpouryouzband, A. Royal Society Of Chemistry – 12 de febrero de 2020.**

Los hidratos de gas captaron una atención significativa debido a su papel crucial en asegurar el flujo para la industria del petróleo y el gas. Se destacó su amplia presencia natural en la Tierra y su aplicación vital en tecnologías sostenibles, como el almacenamiento de gas y energía, la separación de gases y la desalinización del agua.

Se reconoció la flexibilidad estructural inherente de los hidratos de gas, dependiendo del tipo de moléculas de gas huésped y las condiciones de formación. Además, se exploraron los efectos sintéticos de una variedad de aditivos químicos en sus propiedades, señalando que estas variabilidades podrían ser explotadas para optimizar el papel de los hidratos de gas. Este enfoque incluyó la ampliación de sus aplicaciones industriales y una mayor comprensión de su función en diversas aplicaciones.

- **“Mejora De La Producción De Gas A Partir De Hidrato De Metano Yacimientos Mediante La Combinación De Fracturamiento Hidráulico Y Método De Despresurización”, Feng, Y; Chen, L; Suzuki, A; Kogawa, A. Instituto De Ciencias De Fluidos, Universidad De Tohoku.**

Se propuso la combinación de fracturación hidráulica y despresurización como una estrategia para mejorar la eficiencia en la producción de gas a partir de depósitos de hidratos de metano (MH). Se llevó a cabo un modelado de yacimientos y una investigación mediante simulación numérica para evaluar la efectividad de este enfoque bajo diferentes condiciones de temperatura.

Los resultados de la simulación demostraron que la combinación de fracturación hidráulica y despresurización resultó ser más eficiente para la producción de gas en comparación con el método de despresurización únicamente. En particular, para yacimientos de alta temperatura, se observó una mejora significativa en la disociación de los hidratos y la producción de gas durante las etapas iniciales de despresurización después de la fracturación. Además, se identificó el efecto del tamaño y la permeabilidad de la zona fracturada en la producción de gas.

1.2. Planteamiento del problema

Los hidratos de metano son compuestos de agua y metano que se encuentran en el subsuelo. El metano es un gas natural que se encuentra en el petróleo y el gas natural. Los hidratos de metano es una fuente de energía no renovable que se puede utilizar para generar electricidad, calentar edificios y cocinar. Los hidratos de metano se encuentran en la mayoría de los países del mundo,

pero la mayor parte del recurso se encuentra en Rusia, Estados Unidos, Canadá, China, India y Australia (Luna, 2014).

Los hidratos de metano se extraen del subsuelo mediante el proceso de fracturamiento hidráulico. El fracturamiento hidráulico es una técnica de perforación que se utiliza para crear pequeños agujeros en el suelo. Estos agujeros se llenan con agua y arena para fracturar la roca y liberar los hidratos de metano; el fracturamiento hidráulico es una técnica controversial debido a los posibles efectos ambientales. Los estudios han indicado que el fracturamiento hidráulico puede causar daños a las capas de agua subterránea, contaminar el agua potable y causar sismos (Luna, 2014).

Con base en lo anterior surge la inquietud de investigar cómo se lleva a cabo la viabilidad del fracturamiento hidráulico aplicado sobre los yacimientos de hidratos de metano.

1.3. Justificación

El fracturamiento hidráulico es una técnica de explotación de recursos naturales que se ha utilizado en México desde la década de 1970. Aunque se ha aplicado principalmente en la explotación de yacimientos petrolíferos, también se ha utilizado en la minería, la geotermia y, más recientemente, en la explotación de yacimientos de hidratos de metano (HM). Los HM son un compuesto de metano y agua que se encuentra en el fondo marino y se forma a partir de la descomposición de materia orgánica en el agua fría y pesada. Aunque los HM son un recurso natural abundante, su explotación a gran escala es una tecnología relativamente nueva y, por lo tanto, su impacto ambiental y social es todavía poco conocido.

El objetivo de este estudio es analizar el impacto ambiental y social del fracturamiento hidráulico en HM en Aguas Profundas del Golfo de México. Para ello, se encontró un análisis cualitativo de la literatura disponible sobre el tema. Se encontró que el impacto ambiental del fracturamiento hidráulico en HM es relativamente poco conocido, pero que los estudios disponibles indican que puede ser significativo. Los impactos sociales del fracturamiento hidráulico en HM son aún menos conocidos, pero se espera que sean similares a los de otros tipos de explotación de recursos naturales.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar la metodología aplicada en la explotación de hidratos de metano en el Golfo de México e identificar el comportamiento de estos al exponerse al fracturamiento hidráulico en los yacimientos no convencionales.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Identificar los tipos de hidratos presentes en aguas profundas del golfo de México.
2. Comprender la función e impacto del fracturamiento hidráulico en el ecosistema y en la industria.
3. Analizar la naturaleza y comportamiento de los hidratos de metano.
4. Identificar la ubicación de los distintos yacimientos de hidratos de metano en el Golfo de México.
5. Crear un código para facilitar los cálculos que permitan determinar la temperatura y presión de formación de hidratos de metano en yacimientos no convencionales en aguas profundas del Golfo de México.

1.5. Hipótesis

Es posible analizar e interpretar los métodos óptimos y eficientes para la extracción de hidratos de metano con el uso del fracturamiento hidráulico debido a que los altos costos de extracción por la fragilidad de los cristales suele ser un inconveniente al momento de considerar este recurso de forma potencialmente mayor.

La interpretación de lo antes mencionado concluye en una identificación del fracturamiento hidráulico como una potencial herramienta para la extracción de hidratos de metano, recabando en análisis las mejores condiciones para que el mismo pueda ser utilizado de forma eficiente.

1.6. Alcances y limitaciones

El objetivo de este estudio es analizar la factibilidad del fracturamiento hidráulico en hidratos de metano como yacimiento no convencional en aguas profundas del Golfo de México. Para ello, se

han considerado diversos aspectos como la composición y estructura de los hidratos, la geología del yacimiento, así como el impacto ambiental del fracturamiento hidráulico.

A partir de este análisis, se han podido establecer alcances y limitaciones en el uso de esta técnica de extracción de hidrocarburos.

Se cuenta con bibliografía suficiente abordando el tema, incluyendo los idiomas en español, inglés y árabe, pero se abordarán las fuentes con un enfoque al lenguaje mayormente destinado al que está dentro de nuestro entendimiento y dominio, limitando los mismos a sólo emplear la información castellana y anglosajona.

El desarrollo de este proyecto consiste en un enfoque de análisis, por lo que para las secciones que requieren de gráficos y de diagramas en ejemplificación de los subtemas, se limita a usar únicamente las ilustraciones proporcionadas por la bibliografía. Este proyecto se limita a usar la información disponible en literatura, así como considerar trabajos de acceso abierto. Todo esto llegando a un alcance de presentar un enfoque teórico en el desarrollo del trabajo.

El diagrama de Katz-Gas en función del metano para el cálculo de la temperatura de formación de hidratos, compila en su estructura determinadas constantes que no pueden verse afectadas por condiciones adversas que no sean las estipuladas en su propio modelo, por lo que aspectos geológicos como la permeabilidad, porosidad y condiciones como la profundidad son individuales al alcance del desarrollo del código en Python.

Capítulo II. Marco teórico

2.1. Gas natural

Conceptualmente el gas natural es definido como un hidrocarburo característico de los yacimientos y que su principal componente es el metano; en el 2003 este hidrocarburo gaseoso solía ocupar el tercer puesto dentro de las fuentes de energía primaria, abarcando un total de 24% en las fuentes globales, teniendo aplicaciones que van desde su uso doméstico, aplicaciones comerciales e industriales hasta procesos más complejos como la cogeneración termoeléctrica (Marcelo Arias, 2006).

A partir del planteamiento de Fuentes (2010) e interpretación de Carrillo y Guerrero (2013), el propio gas natural es una mezcla de carácter homogéneo, en proporciones consideradas variables de hidrocarburos parafínicos, ciertamente denominados alcanos. Estos hidrocarburos suelen ser llamados “Hidrocarburos Saturados”, debido a la relación de la hibridación. El gas natural a pesar de sus altos contenidos en metano contiene además una menor cantidad de gases inorgánicos, siendo fundamentalmente:

- Nitrógeno
- Dióxido de Carbono
- Sulfuro de Hidrógeno
- Monóxido de Carbono
- Oxígeno
- Vapor de Agua

Entre algunos otros componentes, siendo los ya mencionados los más abundantes en su mínima proporción dentro de la composición del gas natural (Carrillo y Guerrero, 2013) .

2.2. Metano

Caballero y Pérez (2014) describen al metano como como el hidrocarburo más simple, gaseoso a temperatura ambiente y que se encuentra en la naturaleza en grandes cantidades, constituyendo así un 90% del total de gas natural en el mundo; no obstante, en proporciones se encuentra junto al etano, llamado de otra manera como “el gas pizarra”, siendo este una mezcla de hidrocarburos gaseosos atrapados en estas mismas rocas. Debido a la superioridad de calor molecular

sobresaliendo entre los demás hidrocarburos, se le considera un excelente combustible. No obstante, su transporte es considerado como problemático debido a su comparación con gases como el propano y el butano.

Debido a las reservas y a lo accesible que resulta para la industria y el empleo doméstico, pueden situarlo como uno de los principales combustibles para la industria química, pero se le considera tan simple como para presentar dos situaciones, debido a la energía de disociación y la baja polaridad de sus enlaces.

2.3. Hidratos

Los hidratos se generan a partir de la combinación de hidrocarburos en estado gaseoso y agua líquida solidificados en formaciones ligeramente por encima del punto de congelación del agua, adquiriendo un aspecto semejante a la nieve o al hielo.

Normalmente llega a ser considerado un contratiempo para la extracción convencional de hidrocarburos gaseosos (Parra, 2004) provocando taponamiento y obstrucción en las tuberías de producción.

No obstante, Landín Sandoval hace la estimación en su proyecto acerca de la importancia de los hidratos de metano como fuente de energía el hecho de que estos significan una alta concentración de energía y que los resultados de una investigación de Ocean Drilling Program indican que solamente el gas en hidratos interceptado en la costa del Atlántico de Estados Unidos puede ser recuperado mediante diferentes métodos.

2.4. Estructura de los hidratos

Están formados aparentemente en una pequeña estructura cristalina, misma que puede presentarse en tres peculiares presentaciones, tipo I, tipo II y tipo H.

2.4.1. Estructura tipo I

Se trata de una formación a base de moléculas más pequeñas que el propano tratándose de:

- Metano
- Etano
- Dióxido de carbono

Con 46 moléculas de agua por cada ocho moléculas de gas, en otras palabras, formado por dos cavidades pequeñas y seis cavidades grandes, replicando una estructura considerablemente cúbica de cuerpo-centrado fumado por un dodecaedro pentagonal, o sea un sólido de doce caras pentagonales (Figura 2.1) (Parra, 2004).



Figura 2.1. Estructura de hidrato tipo I. Fuente (Parra, 2004).

2.4.2. Estructura tipo II

La estructura de este tipo se forma cuando los gases llegan a formar estructuras por moléculas de un tamaño superior al de etano, pero inferiores ante el pentano, estas se definen en:

- Propano
- iso-butano
- n-butano

Contando un total de 136 moléculas de agua por cada 24 moléculas de gas, de las cuales 16 entran en las cavidades pequeñas de la estructura y ocho en las cavidades más grandes de la estructura de tipo II. En la figura 2.2. Se muestra un enrejado de diamante dentro de un armazón cúbico, mismo que se interpreta como una formación de doce pentágonos y cuatro hexágonos (Parra, 2004).



Figura 2.2. Estructura de hidrato tipo II. Fuente (Parra, 2004)

2.4.3. Estructura tipo H

Se caracterizan por ser estructuras únicas en la naturaleza de los hidratos, pues se forman de gases ligeros como lo son el metano y las moléculas pesadas de metilciclopentano, metilciclohexano y ciclooctano. Basando su estructura en 34 moléculas de agua por cada seis moléculas de gas, mostrando una estructura de doce pentágonos de los cuales se forman 3 cuadrados con 6 pentágonos y tres hexágonos que forman un dodecaedro, que asimismo forman dos cavidades. En todas las cavidades se considera una sola molécula de gas adecuada que entra a estabilizar esta. Una formación de doce pentágonos y ocho hexágonos (Parra, 2004).



Figura 2.3. Estructura de tipo H. Fuente (Parra, 2004)

2.5. Hidratos de metano

Patricio A. Marshall, (2002), menciona que, en relación con los hidratos de metano, se observa que son un tipo específico de hidratos de gases, los cuales constituyen compuestos naturales identificados desde el siglo XIX, aunque ha habido un creciente interés en ellos en tiempos recientes. Estos compuestos cristalinos sólidos consisten en una combinación de agua y metano,

siendo estables en entornos caracterizados por bajas temperaturas y altas presiones, condiciones comunes en lugares como los fondos marinos y las regiones terrestres de altas latitudes con suelos congelados o "permafrost". Inicialmente, se les percibía como una rareza científica o un desafío para la ingeniería. De hecho, el interés en los hidratos de metano para la industria petrolera estaba relacionado con los problemas que generaban al acumularse en las tuberías de producción y transporte, lo que reducía el flujo y podía llegar a bloquear completamente el paso, dando lugar a peligrosas situaciones de alta presión. En consecuencia, se han realizado progresos en la investigación sobre su estructura, propiedades físicas y métodos para su eliminación.

Simultáneamente, se ha comenzado a considerar a estos hidratos como posibles recursos energéticos, además de reconocer su importancia en los estudios sobre el cambio climático global y en la gestión de los gases de efecto invernadero. Otros desarrollos derivados de las investigaciones están relacionados con su potencial capacidad para el almacenamiento y transporte de gas. Los hidratos de gases son compuestos que se conocen desde 1811, cuando H. Davy descubrió la presencia de hidratos de cloro, y más tarde se confirmó que otros gases también podían formar este tipo de compuestos. Se caracterizan por presentarse en forma de sólidos cristalinos similares al hielo, con una composición variable dependiendo de las condiciones físicas en el momento de su formación.

2.6. Yacimiento no convencional

Un yacimiento no convencional se postula por todas aquellas acumulaciones de hidrocarburos que existen en las rocas que se encuentran en la parte inferior de ciertas formaciones geológicas. Un yacimiento no convencional se refiere a aquellos hidrocarburos que normalmente se encuentran atrapados en la roca generadora, o sea que estos no han migrado hacia una roca almacén.

2.6.1. Características de los yacimientos no convencionales

Las características que dependerán el tipo de roca determinarán la naturaleza de un yacimiento, Hidalgo Bermeo (2020) describe los elementos clave para caracterizar e identificar los rasgos de un yacimiento no convencional.

- Roca Madre: Roca madre o roca generadora como normalmente se utiliza, esta se identifica con un horizonte estratigráfico.

- Migración: Los hidrocarburos no tienen una migración debido a que estos mismos permanecen en la roca generadora por la cual se debe a su baja permeabilidad.
- Porosidad: La porosidad dentro de los yacimientos no convencionales es baja, estos cuentan con menos de 10%.
- Permeabilidad: Los poros se encuentran intercomunicados y estos son fracturados artificialmente, entonces, su permeabilidad es muy baja.
- Presión de Poro: Esta es generada por la presión natural que es principalmente ocasionada por los diferentes cambios geológicos debido a la deposición y compactación.

2.6.2. Tipos de porosidad

Basándose en la propuesta de porosidad de Rodríguez y Javier (2010), se considera la porosidad como una propiedad física, la cual también puede ser tratada como un parámetro numérico con el fin de determinar el volumen de los espacios vacíos o el volumen poroso por unidad de volumen total de la roca.

Hay diversas formas en las que la porosidad puede comportarse, siendo la porosidad total y la porosidad abierta las más relevantes en esta categoría. Sin embargo, dependiendo de las características de los espacios vacíos considerados, pueden existir otros tipos de porosidad, como la porosidad cerrada, accesible, comunicada o efectiva para un cierto parámetro de comportamiento.

2.6.2.1. Porosidad total (n)

Es una medida fundamental en la caracterización de rocas y suelos, ya que proporciona información crucial sobre la capacidad de almacenamiento y flujo de fluidos dentro de un medio poroso. Se define como el volumen total de espacios vacíos por unidad de volumen total de roca, teniendo en cuenta todos los tipos de poros presentes, ya sean abiertos, cerrados, accesibles o no accesibles. Sin embargo, es importante destacar que los poros no accesibles no pueden ser determinados experimentalmente debido a su inaccesibilidad, lo que limita la capacidad de cuantificar la porosidad total de manera precisa en ciertos casos.

Rodríguez y Javier (2010) proponen una definición adicional de la porosidad total como el máximo valor posible de porosidad para un material, asumiendo que todos los poros están conectados hacia

el exterior de la muestra. Esta definición establece un límite teórico que ayuda a comprender la máxima capacidad de almacenamiento de fluidos de un medio poroso.

2.6.2.2. Porosidad abierta (no)

En relación con la porosidad total, la porosidad abierta (no) es de particular interés, ya que se refiere específicamente a los poros accesibles o comunicados entre sí y con el exterior de la roca por unidad de volumen total. Su determinación se realiza mediante técnicas experimentales que implican la introducción de fluido en los poros para medir su volumen. El método más común es la saturación de los espacios vacíos con agua bajo presión hidrostática, siguiendo los protocolos establecidos para obtener la porosidad abierta "accesible al agua" (Rodríguez y Javier, 2010).

La porosidad abierta juega un papel crucial en la evaluación de la permeabilidad de un medio poroso, ya que los poros accesibles son los que permiten el flujo de fluidos a través del material. Por lo tanto, comprender la distribución y conectividad de estos poros es fundamental para predecir el comportamiento de la roca o suelo en aplicaciones geotécnicas, ingeniería de petróleo, hidrogeología y muchas otras disciplinas relacionadas con las geociencias.

2.6.3. Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que contiene un material debido a que este puede permitir que el fluido pueda atravesar la estructura interna. La permeabilidad es el resultado de un material que es permeable es que deje pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable (Vélez, 2010).

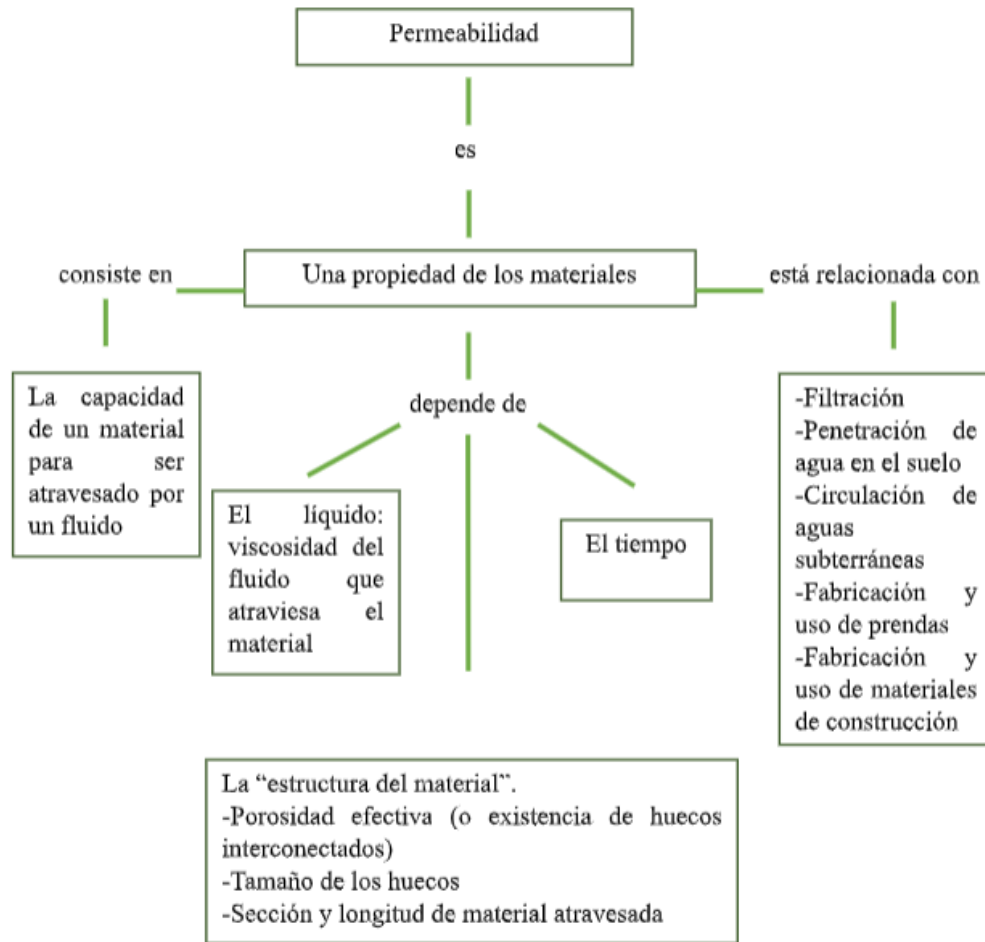


Figura 2.4. Definición de permeabilidad. Fuente (Vélez 2010)

2.6.4. Tipos de permeabilidad

La permeabilidad es un parámetro fundamental en la geología que hace referencia a la capacidad de una roca para permitir el flujo de fluidos a través de sus poros en un determinado período de tiempo (Vélez, 2010). Este concepto es de gran importancia en diversos campos de estudio, ya que afecta directamente la capacidad de un suelo para retener agua, la movilidad de los fluidos subterráneos y la distribución de los recursos minerales.

En el contexto de la geología, la determinación precisa de la permeabilidad del suelo desempeña un papel crucial en la comprensión de procesos como la erosión del suelo y la formación de depósitos minerales. Por ejemplo, en el estudio de la erosión, la permeabilidad influye en la capacidad del suelo para retener agua y, por lo tanto, en su resistencia a la erosión hídrica. Asimismo, en la exploración de recursos minerales, la permeabilidad juega un papel determinante en la migración y acumulación de fluidos que transportan minerales valiosos.

La determinación precisa de la permeabilidad del suelo se logra mediante técnicas de laboratorio y campo, que pueden incluir desde pruebas de permeabilidad in situ hasta análisis de muestras de suelo en laboratorio utilizando métodos como la permeabilidad al agua o al aire. Estos métodos permiten obtener datos cuantitativos sobre la capacidad de un suelo para permitir el flujo de fluidos, lo que a su vez facilita la evaluación de su idoneidad para diversos fines, como la agricultura, la ingeniería civil o la exploración de recursos naturales (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Relación entre tipos de permeabilidades, Fuente: (COAAT, 2007)

Permeabilidad relativa	Permeable				Semi-Permeable				Impermeable				
Arena o grava no consolidada	Grava continua (o redondeada)		Arena continua o mixta		Arena fina, cieno. Loess, Loam								
Arcilla no consolidada y materia orgánica					Turba		Estrato arcilloso			Arcilla expansiva			
Roca consolidada	Rocas muy fracturadas				Roca petrolífera			Piedra arenisca		Roca sedimentaria, Dolomita		Granito	
K (cm ²)	0.001	0.0001	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁵

2.7. Fracturamiento hidráulico

El fracturamiento hidráulico o también conocido como Fracking, es una técnica eficaz para la extracción de gas o petróleo en los yacimientos no convencionales debido a que estos aún se encuentran atrapados en la roca generadora y no han tenido oportunidad de migrar, entonces esta técnica es viable al explotar estos tipos de yacimientos. El fracturamiento hidráulico se basa en la perforación de un pozo horizontal en el subsuelo, en el cual se inyecta cierta cantidad de fluido fracturante para obtener una conectividad efectiva de la formación con el pozo.

2.7.1. Etapas del fracturamiento hidráulico

El fracturamiento hidráulico consiste en varias etapas que debe pasar para llevar a cabo un fracturamiento adecuado, (Figura 2.4) las etapas son las siguientes:

1. **Colchón:** Esta etapa es una de las principales debido a que es donde se bombea el agua sin ningún método sustentable, el principal objetivo es vencer la presión de formación del

yacimiento y así obtener las fracturas para poder inyectar los fluidos. Otro objetivo dentro de esta etapa es mantener abierta la fractura. Y es aquí donde se enfatiza el cuestionamiento de, cómo es que se mantiene abierta.

2. **Fluido con apuntalante:** La segunda etapa consiste en inyectar el fluido, pero a diferencia del anterior es que este será inyectado con el agente apuntalante ya que este tiene como objetivo mantener la fractura abierta y a su vez permitir la inyección de fluidos, es muy importante mantener que el fluido apuntalante se encuentre suspendido dentro de los fluidos para así llevar a cabo el asentamiento del apuntalante dentro de la tubería.
3. **Limpieza:** La tercera etapa lleva por nombre limpieza, como su nombre lo dice esta se encarga de limpiar el apuntalante, esto se hace debido a que el apuntalante quede dentro de la fractura y no dentro de las tuberías, por ello se debe bombear el fluido hasta que quede limpio el apuntalante, el fluido debe ser controlado en cuestión de cantidad ya que esto evita que el apuntalante no quede fuera de las grietas que han sido creadas durante el fracturamiento.
4. **Cierre de fractura:** Por último, tenemos la etapa de cierre de fractura, en esta etapa es donde el bombeo es detenido y provocará que la fractura se empiece a cerrar. Una vez cerrada la fractura la presión hidráulica irá disminuyendo debido a los esfuerzos de formación.

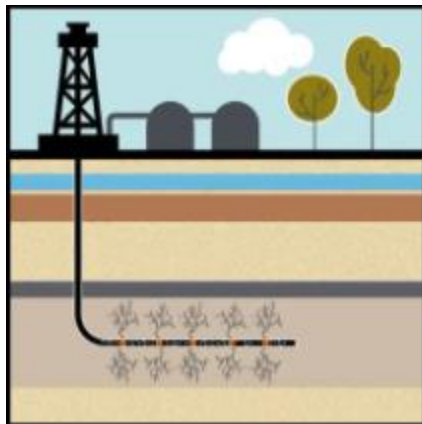


Figura 2.5. Representación de procedimiento de fracturamiento hidráulico.

Fuente (Vectorial, gráficos, 2013)

2.7.2. Clasificación y tratamiento de componentes

Para que el tratamiento pueda ser llevado a cabo menciona Marrufo que se requieren al menos los siguientes componentes:

- Fluidos: Tienen la responsabilidad de iniciar y mantener la fractura, la selección de fluido es muy importante ya que este debe ser compatible con la roca, su viscosidad debe reducir al máximo las pérdidas de presión por fricción y gracias a sus condiciones reológicas este debe disminuir su viscosidad al con el paso del tiempo para poderlo bombearlo fuera de forma más efectiva y eficiente. Se utilizan una variedad de fluidos para optimizar el proceso de fracturamiento de formaciones geológicas. Estos fluidos pueden clasificarse en tres categorías principales:
 1. Base agua: Los fluidos base agua pueden ser gel lineal o reticulado.
 2. Base aceite: Los fluidos base aceite pueden ser crudo, refinado o gelificado.
 3. Multifase líquido-gas: Los fluidos multifase líquido-gas pueden contener nitrógeno o dióxido de carbono.
- Aditivos: Desempeñan un papel crucial en la modificación de las propiedades de estos fluidos. Gelificantes: Son polímeros de alto peso molecular solubles en agua que aumentan la viscosidad de la solución acuosa.
- Activadores: Son productos diseñados para unir las cadenas de polímeros en el fluido gelificado.
- Rompedores: Son sustancias que reducen la viscosidad al romper las cadenas de polímeros.
- Estabilizadores de arcillas: Se utilizan para evitar el hinchamiento y migración de arcillas en la formación, así como controladores de pH para mantener un pH específico que favorezca la gelificación y activación del fluido.
- Surfactantes: Son sustancias que evitan la formación de emulsiones entre los hidrocarburos y el agua del fluido de fractura, lo que podría dificultar la producción.
- Bactericidas: son compuestos que previenen el crecimiento y proliferación de bacterias en el agua utilizada para preparar el fluido fracturante, evitando así la degradación del fluido y la reducción de su viscosidad.
- Apuntalantes: El agente apuntalante es el encargado de mantener abiertas las grietas y permitir la migración de fluidos desde el yacimiento hasta el pozo para posteriormente sean llevados a superficie. Las principales características del apuntalante son:

- Alta permeabilidad
- Alta fuerza y resistencia a los choques
- Baja densidad
- Insolubilidad en los fluidos de la formación
- La redondez y esfericidad
- Gravedad específica
- Densidad
- El tamaño del grano
- La solubilidad en ácido
- El contenido de limo y arcilla
- La resistencia a la compresión y el agrupamiento

Estos son algunos de los componentes que se utilizan para el tratamiento durante el fracturamiento hidráulico, Pinzón, A; Lasso, D; Vergel, M; Sierra, L. (2013).

2.7.3. Fracturamiento hidráulico uso intensivo en campos de gas

El 20 de agosto de 2019, la Comisión Nacional de Hidrocarburos emitió un informe detallando el uso intensivo del fracturamiento hidráulico en campos de gas, una técnica de extracción de hidrocarburos.

En la zona terrestre de México, se han perforado un total de 30,558 pozos, de los cuales se dispone de información de perforación para 19,563 pozos. De estos, 8,457 pozos terrestres han experimentado fracturamiento hidráulico en algún momento de su historia, constituyendo el 43% del total de pozos terrestres, siendo solo 27 de ellos perforados con objetivos no convencionales, según datos recopilados por el Centro Nacional de Información de Hidrocarburos (CNIH).

La distribución geográfica de esta técnica revela que tres estados acaparan el 80% de los pozos sujetos a fracturamiento hidráulico: Tamaulipas con 2,734 pozos, Veracruz con 2,270 y Nuevo León con 1,776. Este fenómeno destaca la concentración de la actividad en áreas específicas.

El análisis de los campos que albergan pozos sometidos a fracturamiento hidráulico revela que el 60% de estos corresponden a campos de gas. Los 8,457 pozos que han experimentado esta técnica han logrado la recuperación de 1,476 millones de barriles de aceite y 12,038 millones de pies cúbicos, equivalente a 3,884 millones de barriles de petróleo crudo equivalente. Esta producción representa un 7% de la producción histórica de hidrocarburos en el país.

Es importante señalar que durante la implementación del fracturamiento hidráulico en estos pozos, Petróleos Mexicanos actuaba como el operador petrolero. Actualmente, 695 de estos pozos se encuentran ubicados en áreas contractuales de 31 contratos, operados por 23 operadores distintos a Pemex, según información proporcionada por la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) en 2019 (Figura 2.5). Este cambio en la operatividad destaca la diversificación de actores en la industria de extracción de hidrocarburos en el país.



Figura 2.6. Número de pozos con fracturamiento hidráulico y ubicación. Fuente (Comisión Nacional de Hidrocarburos, 2019)

2.7.4. El impacto ambiental del fracturamiento hidráulico

Valdés Aguirre (2018) argumenta sobre que, el fracturamiento hidráulico en cuestión del medio ambiente ha sido un tema debatible y polémico, debido a que se ha dicho que esta técnica contamina demasiado el medio ambiente. Se dice que, a la hora de fracturar, son inyectadas sustancias químicas que pueden contaminar acuíferos que se encuentran cerca de donde se hace la fractura, por otra parte, también se dice que el fracturamiento hidráulico puede provocar la denominada sismicidad inducida, debido a que se fractura a una fuerza moderada que puede afectar a las placas tectónicas y a la superficie.

La significativa repercusión ambiental de la fractura hidráulica ha sido objeto de análisis en informes recientes elaborados por instituciones europeas, entre las que se incluyen el Parlamento Europeo y la Comisión Europea. Además, prestigiosos centros de investigación como el Tyndall Center para la investigación del Cambio Climático, un consorcio conformado por nueve

universidades británicas, han abordado esta cuestión. Incluso organismos de la administración estadounidense, como la US Government Accountability Office, han realizado estudios que arrojan resultados críticos similares. Estos informes convergen en destacar las preocupaciones medioambientales asociadas con la fractura hidráulica, proporcionando una visión integral respaldada por diversas fuentes de autoridad.

2.7.4.1. Contaminación de los acuíferos por fluidos vertidos

El proceso de fracturamiento hidráulico implica el uso de grandes cantidades de agua, arena y aditivos que se mezclan para inyectarse en la perforación previa y crear la fractura deseada. Esta mezcla debe ser luego recuperada y almacenada en un lugar adecuado después de ser separada en sus componentes. Según un estudio del Centro Tyndall, solo se recupera entre un 15% y un 80% de esta mezcla, lo que indica que al menos un 20%, y posiblemente más, se desvía de alguna manera. Una de estas formas de desviación es a través de la filtración hacia el suelo, mediante las fracturas creadas durante el proceso. Esta filtración puede contaminar los mantos subterráneos que suministran agua potable a la población. Numerosos casos en Estados Unidos, como el de Pavillion, Wyoming en 2010, han evidenciado la contaminación del agua pública cerca de pozos influenciados por el fracturamiento hidráulico, como lo señaló un estudio preliminar de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

2.7.4.2. Emisiones a la atmósfera

Según investigaciones llevadas a cabo por diversas instituciones académicas, como las universidades de Wyoming y Pensilvania en colaboración con el Instituto Manhattan, Valdés Aguirre argumenta que se ha identificado que una parte considerable de la contaminación está asociada con la fase final del proceso de fracturamiento hidráulico. Durante esta etapa, se procede a la extracción y compresión del gas o petróleo con el fin de distribuirlo posteriormente. Estos recursos contienen una variedad de componentes, entre los que se incluyen el metano, dióxido de carbono e hidrocarburos pesados.

Las emisiones de gases de efecto invernadero generadas durante este proceso impactan negativamente en la calidad del aire, según señalan las investigaciones mencionadas anteriormente. Por ejemplo, el metano, un gas de efecto invernadero altamente potente, tiende a liberarse fácilmente de las cisternas de contención y los pozos. Además, las actividades asociadas con la

perforación, el procesamiento y el transporte del gas hasta los consumidores finales implican el consumo de combustibles fósiles que contribuyen a la generación de emisiones adicionales.

Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar los impactos ambientales asociados con el proceso de fracturamiento hidráulico, incluyendo la contaminación atmosférica y la emisión de gases de efecto invernadero, con el fin de tomar decisiones informadas en materia de política energética y ambiental.

2.7.4.3. Contaminación al suelo

La contaminación del suelo asociada con el fracturamiento hidráulico no se limita únicamente a la infiltración de la mezcla durante la excavación. Según el Centro para la Energía Global, Arbitraje Internacional y Legislación Ambiental de la Escuela de Leyes de la Universidad de Texas, se producen derrames a lo largo de todo el proceso de fracturamiento hidráulico. Estos derrames pueden ocurrir durante el transporte de los residuos o debido a problemas con las estructuras que no están bien ajustadas. Es decir, existen múltiples puntos durante el proceso donde se pueden originar derrames que contribuyen a la contaminación del suelo.

2.7.4.4. Repercusiones al paisaje

La construcción de estructuras para el fracturamiento hidráulico es una actividad industrial que implica la creación de rutas de acceso, tanques de contención, equipos de perforación, camiones de transporte, entre otros elementos necesarios. Estas estructuras ocupan un área de alrededor de 1.5 a 2 hectáreas, y los pozos se distribuyen a una distancia de aproximadamente $1.25^{-3}/\text{km}^2$.

En el caso del Reino Unido, para producir gas anualmente durante un período de 20 años, se necesitarán entre 430 y 500 pozos, lo que requeriría cubrir un área de 140 a 400 km^2 . Para ponerlo en perspectiva, esta área equivaldría aproximadamente al tamaño de la Isla de Wight. Esto resalta la extensión del impacto que la construcción y operación de pozos de fracturamiento hidráulico tendría en el paisaje y el entorno natural.

2.7.4.5. Movimientos sísmicos

Se ha planteado la posibilidad de que la fracturación hidráulica pueda desencadenar movimientos en las placas tectónicas, lo que resultaría en sismos de diversas magnitudes. Esto se debe a la inyección presurizada de la mezcla utilizada en el proceso, especialmente en formaciones de

pizarra, que son extremadamente frágiles. La pizarra se fractura para permitir la liberación de los hidrocarburos, pero su fragilidad significa que puede romperse fácilmente y colapsar, lo que a su vez podría provocar movimientos involuntarios en otras placas tectónicas. Esta teoría sugiere una posible conexión entre la fracturación hidráulica y la actividad sísmica, lo que plantea preocupaciones adicionales sobre los riesgos asociados con esta técnica de extracción de recursos.

2.7.4.6. Productos químicos y radioactivos

En 2011, según una investigación del New York Times, se encontró que alrededor del 75% de los 240 yacimientos estudiados en Pennsylvania y Virginia del Este presentaban residuos de agua con elementos radioactivos. En 116 de estos yacimientos, los niveles de estos elementos excedían en un 200% el límite establecido por la EPA. Además, se observó que los productos químicos utilizados en las perforaciones plantean riesgos para la salud. Se ha documentado que el 25% de estos productos químicos tienen potencial carcinogénico, el 37% puede afectar el sistema endocrino, entre el 40% y el 50% pueden impactar el sistema nervioso, el sistema inmunológico y el sistema cardiovascular, y más del 75% pueden amenazar la salud de los órganos sensoriales y el sistema respiratorio (Valdes Aguirre, C.L., 2018). Estos resultados resaltan las inquietudes acerca de los riesgos asociados con la fracturación hidráulica en términos de salud y medio ambiente.

2.7.5. Fluido fracturante

El fracturamiento hidráulico se lleva a cabo para crear fracturas en una formación objetivo mediante la inyección de un fluido fracturante a una presión mayor que la presión de fractura de la formación. Este fluido mantiene las fracturas abiertas mediante la acción de un ácido que actúa como disolvente sobre parte de la roca, lo que se conoce como fracturamiento ácido y se aplica comúnmente en formaciones carbonatadas.

Los fluidos de fractura, según Luna García (2014), son responsables de crear y extender las fracturas con la ayuda de la energía proporcionada por bombas. Estos fluidos están compuestos por un fluido base, agentes apuntalantes o sustentantes, y una variedad de productos químicos. Pueden ser a base de agua, aceite, espumosos o ácidos, y comparten características similares con los lodos de perforación.

Por lo general, los fluidos de fractura están compuestos en su mayoría por agua, que constituye entre el 98% y el 99% de su volumen total, típicamente agua dulce. El agente apuntalante representa

entre el 1% y el 1.19% del volumen total, y suele consistir en arenas o cerámicas transportadas por el fluido de fractura. El volumen restante está compuesto por productos químicos, que se añaden en una proporción que va del 0.1% al 1% del total.

2.8. Yacimientos de hidratos de gas en el Golfo de México

Debido al potencial para aprovechar los hidratos de metano como una fuente de energía rentable y abundantemente disponible en comparación con las mayores reservas mundiales actuales de petróleo, gas y carbón juntas, varios autores estiman que los hidratos de metano duplican estas reservas (Parra, 2004). Además, Landín Sandoval confirma la estabilidad de los hidratos de metano, señalando que no solo se encuentran en condiciones de aguas frías y profundas de los fondos marinos, sino que también se ha confirmado su presencia en el Golfo de México en aguas poco profundas con temperaturas de hasta 20°C y a profundidades de más de dos kilómetros (Figura 2.6). Este hallazgo amplía las posibilidades de explotación de los hidratos de metano y su potencial como una fuente de energía significativa en el futuro.

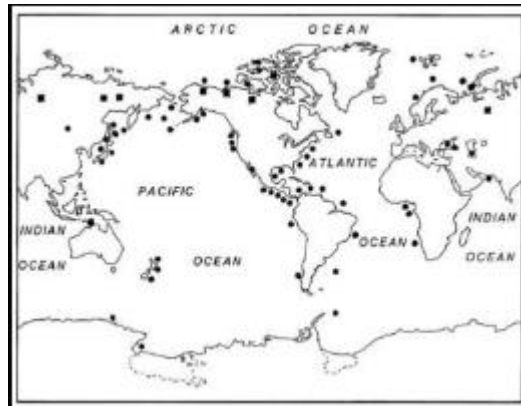


Figura 2.7. Mapa de las localizaciones de hidratos de gas en sedimentos en tierra. Fuente (Parra E, 2004)

En el año 2002, Petrotecnia publicó un informe que destacaba que la distribución de las acumulaciones de hidratos de gas metano está condicionada por las bajas temperaturas y las altas presiones relativas. Se encontraron hidratos no solo en suelos congelados de Siberia, Alaska y Canadá, sino también en distintos fondos marinos. Es relevante mencionar que tanto las costas de los Estados Unidos como Japón, así como el Golfo de México, son reconocidos como potenciales reservorios de hidratos de gas metano (Marshall, 2002). Este informe subraya la amplia distribución geográfica de los hidratos de gas metano y su importancia como una posible fuente de energía en varias regiones del mundo.

2.9. Estimulación térmica

La estimulación térmica es un método que implica cambios en la temperatura para alterar la estabilidad térmica de los hidratos de gas metano. Dentro de este método, la fuente de calor puede ser agua caliente, vapor u otro líquido caliente. La fuente de calor se inyecta en la zona donde se encuentra el hidrato estabilizado, lo que aumenta la temperatura y provoca la disociación del hidrato, liberando así el gas. El objetivo principal de la estimulación térmica es inyectar la fuente de calor en el lugar donde se encuentra el hidrato para liberar el gas.

Según el fundamento de Osorio Chávez (2020), el proceso de estimulación térmica comienza bombeando vapor o agua caliente al pozo perforado para alterar la estructura cristalina del gas atrapado en él, permitiendo así la liberación del metano contenido en el hidrato. Posteriormente, el gas puede ser bombeado desde el yacimiento hacia la superficie a través de otro pozo (Figura 3.7). Una vez en la superficie, el gas natural puede ser producido utilizando tecnología convencional, teniendo en cuenta las condiciones específicas del pozo y la formación geológica atravesada.

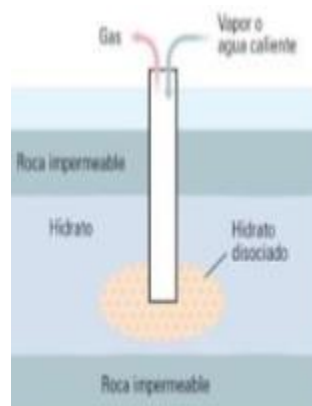


Figura 2.8. Inyección Térmica. Fuente (Osorio Chávez, F.P., 2020)

2.9.1. Inyección de fluidos calientes

Esta técnica implica la inyección de agua caliente en el yacimiento con el objetivo de elevar la temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico de los hidratos, provocando así su disociación en el yacimiento.

En el proceso de formación de los hidratos, se libera energía térmica que se utiliza para llevar a cabo la disociación del gas. Este método presenta un balance positivo, ya que la energía térmica requerida para disociar el gas es de aproximadamente el 6%. Es decir, se logra una eficiencia significativa en la liberación del gas mediante este proceso de inyección de agua caliente.

2.9.2. Inyección de agua caliente

La inyección de agua caliente es una técnica que rompe la estabilización de los hidratos aumentando la temperatura de dicho yacimiento por arriba de la temperatura de equilibrio, dentro de esta técnica se deben tomar algunas condiciones, las cuales son:

1. La formación debe contar con la inyección suficiente para tener una exitosa penetración del agua que se está inyectando en el yacimiento y así obtener como resultado la disociación de los hidratos.
2. La formación debe tener un espesor que sea considerado para su vez reducir la pérdida de calor dentro de la formación.

2.9.3. Inyección Cíclica

Esta inyección se basa en tres periodos muy importantes, como primer periodo está el periodo de inyección, este se basa a la inyección del fluido ya calentado, como segundo periodo se encuentra el periodo de remojo, este se trata de mantener el pozo cerrado a un tiempo específico para llevar a cabo el fluido que está siendo inyectado hacia los hidratos para que puedan combinar las temperaturas y tener como resultado la disociación de gas, y por último tenemos el tercer periodo que es el periodo de la disociación del gas.

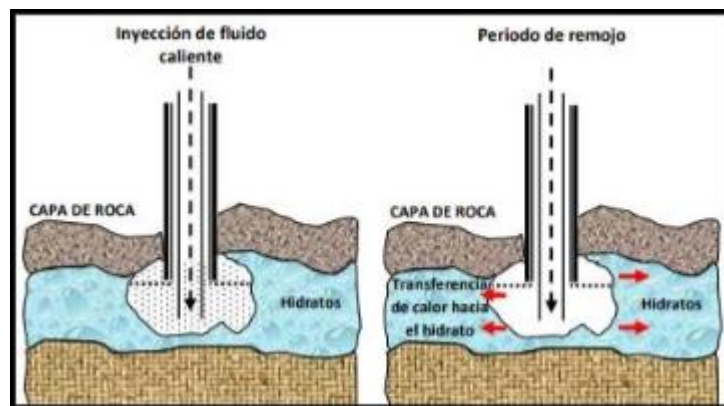


Figura 2.9. Inyección Cíclica. Fuente (Osorio Chávez, F.P., 2020)

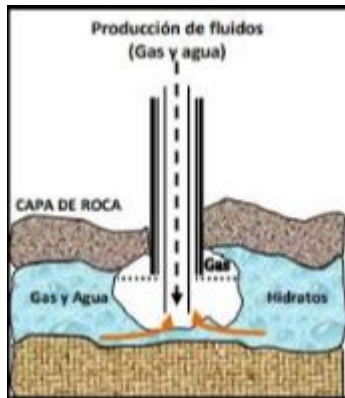


Figura 2.10. Inyección Cíclica. Fuente (Osorio Chávez, F.P., 2020)

2.9.4. Inyección Continua

Este es un tipo de inyección que solo se aplica para pozos productores y para pozos inyectoros, la inyección continua trata de inyectar el agua y obtener el gas ya disociado.

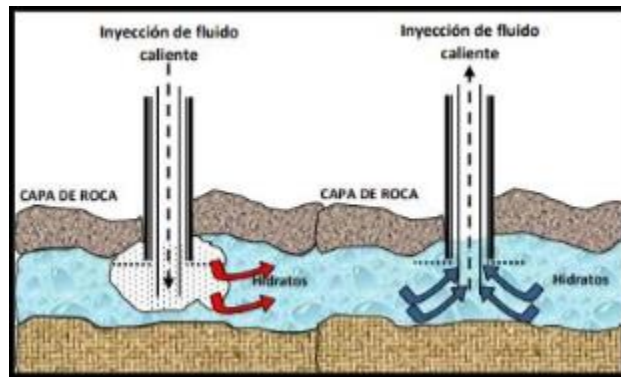


Figura 2.11. Inyección Continua. Fuente (Osorio Chávez, F.P., 2020)

2.9.4. Inyección de vapor

La inyección de vapor es una de las técnicas más recomendables para la extracción de hidrocarburos y a su vez, también es apto para que se aplicado en los yacimientos de gas, esta es una de las técnicas que cuenta con mayor inyección de agua, pero a su vez tiene mayores pérdidas de calor. Esta técnica como la anterior se deriva de dos formas, las cuales son las siguientes:

2.9.5. Inyección Cíclica de Vapor

En este tipo de inyección se realiza inyectando vapor dentro de los yacimientos donde se encuentran localizados los hidratos y a su vez obteniendo la disociación de los hidratos de metano.

2.9.6. Inyección Continua de Vapor

En yacimientos donde se encuentran hidratos de gas, la inyección continua de vapor se lleva a cabo de la siguiente manera: inicialmente, el vapor penetra en la zona del yacimiento y se desplaza rápidamente a través de la parte superior del mismo. Cuando el vapor entra en contacto con la parte superior de la capa de hidratos, estos se disocian en agua y gas. Debido a que los hidratos se consideran relativamente impermeables, los depósitos de hidratos comienzan a formarse delante del frente de vapor. Este proceso de inyección de vapor es descrito por Osorio Chávez (2020) como una estrategia para disociar los hidratos de gas y facilitar la extracción de gas natural del yacimiento.

2.9.7. Generación de calor In-Situ

En los yacimientos de gas, el calor se convierte en una fuente crucial, ya que posibilita la disociación de los hidratos de metano. Este calor desempeña un papel esencial al compensar el efecto endotérmico, facilitando así la descomposición de los hidratos.

A continuación, se describen algunos métodos diseñados para prevenir la pérdida de calor en el pozo, contribuyendo al éxito del proceso de extracción de gas. Estas estrategias están destinadas a optimizar el aprovechamiento del calor y mejorar la eficiencia del proceso de descomposición de hidratos en los yacimientos de gas.

2.9.8. Método de calentamiento electromagnético.

El método de calentamiento electromagnético implica la irradiación de ondas electromagnéticas a alta frecuencia para desencadenar la disociación de los hidratos de metano en un yacimiento (Figura 2.11). En este enfoque, se coloca un electrodo en el fondo del pozo, alcanzando la formación de hidratos de metano, y este electrodo calienta los hidratos, provocando su disociación.

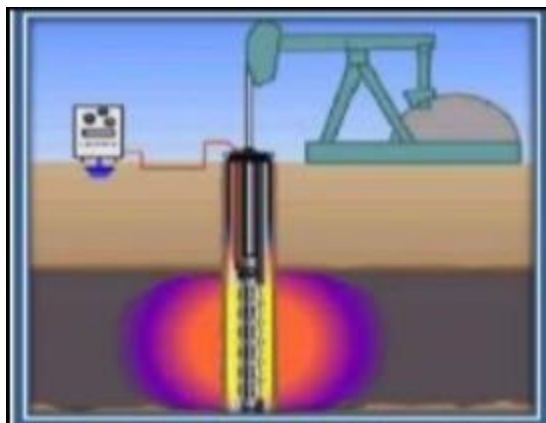


Figura 2.12. Calentamiento electromagnético. Fuente (Osorio Chávez, F.P., 2020)

La interpretación de este método se basa en la interacción de moléculas dentro del yacimiento cuando las ondas electromagnéticas de alta frecuencia son aplicadas. Estas ondas generan una fuente de calor que conduce a la disociación de los hidratos de metano en el yacimiento. La particularidad de este método radica en su suministro directo al yacimiento de hidratos de metano, donde las ondas electromagnéticas interactúan intensamente con las moléculas del yacimiento, generando calor y disociando así los hidratos.

En comparación con otros métodos previamente mencionados, el calentamiento electromagnético destaca por su enfoque directo en el yacimiento, utilizando ondas de alta frecuencia para lograr la disociación de los hidratos de metano. Este enfoque único ofrece una perspectiva prometedora en la búsqueda de métodos eficientes para la liberación de gas en yacimientos de hidratos de metano. Makogon expone que a medida que las ondas electromagnéticas se propagan dentro del yacimiento de hidratos, generan fuentes de calor, fuerzas y momentos de origen electromagnético en todo el volumen del yacimiento. Además, la presencia del campo electromagnético de alta frecuencia tiene un impacto significativo en fenómenos fisicoquímicos como:

- Tensión superficial
- Electrocapilaridad
- Procesos electrocinéticos
- Proceso de difusión
- Proceso de adsorción
- Proceso de filtración

Estas interacciones modifican las condiciones termodinámicas del yacimiento. Por ejemplo, la temperatura aumenta debido a la generación interna de calor, y si alcanza el valor correspondiente

a la temperatura de cambio de fase (disociación) del hidrato, este comienza a descomponerse. El gas y el agua resultantes forman regiones de alta presión que favorecen la filtración hacia el pozo (Gil Sánchez, J.C. y Rojas Parras, F.I., 2008). Este proceso demuestra cómo las ondas electromagnéticas no solo generan calor interno, sino que también influyen en diversos procesos fisicoquímicos, impactando directamente en la estabilidad de los hidratos en el yacimiento.

2.9.9. Método de generación catalítica de calor

Este método se refiere al uso de reacción catalítica exotérmica, debido a que esta reacción al introducirla al yacimiento esta genera el calor suficiente para que el hidrato se disocie. Además del calor utilizado para disociar el hidrato también es generado por otras sustancias utilizadas las cuales son:

- Monóxido de carbono (CO)
- Agua (H²O)

Existe otro proceso que se ocupa dentro de este método debido a que este es utilizado dentro de los yacimientos de hidratos para así disociar el mismo y llevar a cabo este proceso mediante catalítica de calor, el proceso utilizado es la generación catalítica de calor.

2.9.10. Generación catalítica de calor dentro del yacimiento de hidratos

El método implica utilizar una fuente de calor para disociar el metano mediante reacciones térmicas directas en el yacimiento. La eficiencia de este proceso puede evaluarse al comparar el calor necesario para disociar el hidrato de metano en gas y agua, que es de 54 kJ/mol, con el calor de combustión catalítica completa del metano, que es aproximadamente 892 kJ/mol.

En este proceso, para liberar el calor necesario para disociar 1 mol de hidrato de gas y extraer 1 mol de metano, sería necesario quemar 0.06 moles del metano extraído. Del mismo modo, al convertir el metano a SYNGAS mediante oxidación parcial, con un calor de conversión de 360 kJ/mol, se obtiene una relación de 0.15 moles de metano convertido por mol de gas extraído.

Además de la producción de calor para la disociación de los hidratos y la producción de otras sustancias como SYNGAS, que puede utilizarse en la obtención de hidrocarburos más pesados, el Instituto Boreskov propone procesos adicionales en la plataforma, como el secado y purificación del gas producido. Estos procesos tienen como objetivo prevenir problemas en el transporte del gas natural y la síntesis de hidrocarburos más densos para facilitar su transporte. La propuesta del

Instituto Boreskov incluye la generación de potencia eléctrica mediante procesos catalíticos, ofreciendo una solución integral y versátil para aprovechar los recursos de los yacimientos de hidratos de gas (Gil Sánchez, J.C. y Rojas Parras, F.I., 2008).



Figura 2.13. Diagrama de Aplicaciones de Procesos Catalíticos. Elaboración propia con información fuente (Gil Sánchez, J, C y Rojas Parras, F.I 2008).

2.10. Comportamiento de los hidratos de metano

Los hidratos de metano, una inmensa reserva de energía atrapada en el fondo marino, despertaron el interés de los políticos en un principio. Sin embargo, este interés disminuyó al enfrentarse a los desafíos para aprovechar este recurso. Los hidratos tienden a formarse en los márgenes más bajos de los taludes continentales, donde el fondo marino desciende desde unos 150 metros de profundidad hasta varios kilómetros en las fosas abisales.

Los depósitos de hidrato se encuentran a cientos de metros bajo el subsuelo marino, a profundidades más allá del alcance de las plataformas petrolíferas operativas. A pesar de esto, algunos países que buscan reducir su dependencia de los combustibles fósiles importados están explorando formas de superar estas dificultades. Por ejemplo, Japón planea iniciar un proyecto

experimental de explotación de hidratos en el mar de Hokkaido. Mientras tanto, ingenieros estadounidenses están considerando diversas vías para aprovechar la energía almacenada en los hidratos.

En la década de los años treinta, los hidratos de metano captaron la atención de los geólogos cuando los ingenieros observaron la posibilidad de que estos cristales de hielo, saturados de gas, pudieran generar obstrucciones en los gasoductos. Como respuesta, los científicos comenzaron a investigar la estructura y composición de estos hidratos, revelando que consisten en formaciones heladas en forma de jaula con la capacidad de absorber pequeñas moléculas de gases como metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. Este conocimiento es esencial para comprender la naturaleza y el potencial de los hidratos de metano como fuente de energía.

Otro tipo de estructura conforma cavidades más grandes capaces de albergar diversas moléculas pequeñas, así como hidrocarburos de moléculas mayores como el pentano. Las jaulas que constituyen estas estructuras pueden variar en cuanto a los tipos de gases atrapados. En la década de los años sesenta, se hizo el descubrimiento de que los hidratos pueden formarse de manera natural. Los primeros depósitos naturales se encontraron en el permafrost de Siberia y Norteamérica, donde fueron denominados como "gas de los pantanos". Este hallazgo resalta la diversidad y relevancia de los hidratos de metano como fenómeno natural y recurso potencial.

Otra categoría de estructuras que pueden contener diversas moléculas, incluidos hidrocarburos como el pentano, son las grandes cavidades formadas por estas estructuras de jaulas. Estas cavidades varían en características y pueden atrapar diferentes tipos de gases. En la década de 1960, se descubrió que los hidratos de gas pueden formarse de manera natural, con los primeros depósitos encontrados en el permafrost de Siberia y Norteamérica, conocidos como "gas de los pantanos". Una década más tarde, George Bryan y John Ewing del Observatorio Geológico Lamont Doherty identificaron la primera evidencia de acumulaciones de hidratos de metano en el lecho marino a través de estudios sísmicos en la montaña de Blake, una cadena montañosa de 100 kilómetros frente a la costa de Carolina del Norte.

Los sismólogos utilizan ondas sonoras para discernir las capas subyacentes en el fondo marino, que se reflejan de manera diferente según el tipo de lodo y roca. Bryan y Ewing observaron una refracción inusual a una profundidad de aproximadamente 600 metros del subsuelo oceánico, que seguía el contorno de la cadena montañosa. Dedujeron que esto indicaba el límite entre una capa de hidrato de metano y otra capa subyacente de metano libre acumulado. En 1996, se utilizó un

reflector simulador de fondo y cámaras de vídeo submarinas para ubicar hidrato de metano a lo largo de un promontorio en el fondo del Pacífico Norte, ahora conocido como la cresta del Hidrato. Los resultados obtenidos durante la expedición han permitido realizar un análisis detallado de la estructura de los hidratos de metano. Al estudiar la textura y la composición química de su estructura microscópica, se ha confirmado una hipótesis plausible pero previamente no probada: el metano presente en estos hidratos se origina a partir de la descomposición microbiana de la materia orgánica depositada en los sedimentos.

La evidencia de este proceso se observa en la composición isotópica del metano. Se ha encontrado que el metano liberado desde cadenas volcánicas y otras fisuras presenta niveles más altos de carbono 13, un isótopo del carbono con un neutrón adicional. Por otro lado, las bacterias que degradan la materia orgánica en condiciones anóxicas, como las que se encuentran en los sedimentos del fondo marino, tienden a utilizar más carbono 12 en el metano que producen (Figura 2.14).

El área marina frente a las costas de Oregón se ha convertido en un escenario importante para evaluar la estabilidad de los depósitos de hidrato de metano y su posible impacto en la liberación de carbono a la atmósfera. Investigaciones adicionales indican que estos depósitos pueden experimentar una inestabilidad preocupante (Suess, E; Bohrmann, G; Greinert, J; Lausch, E., 2000).

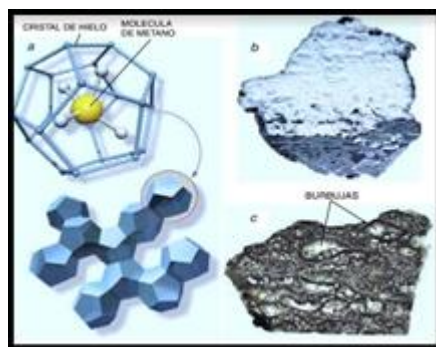


Figura 2.14. Comportamiento de los hidratos de metano.
Fuente (Suess, E; Bohrmann, G; Greinert, J; Lausch, E., 2000)

2.10.1 Estabilidad de los hidratos de metano

Según la ingeniera Verónica Janeth Ladin Sandoval (2007), la presencia de hidratos de gas no se limita únicamente a aguas frías y profundas de los fondos marinos. En el Golfo de México, se ha observado que estos hidratos están presentes tanto en aguas poco profundas, con temperaturas de

hasta 20°C, como a profundidades superiores a 2000 metros. La estabilidad de los hidratos está influenciada por la composición química de los gases que los componen. Por ejemplo, la presencia de etano en la mezcla de gas permite que los hidratos sean estables a presiones más bajas y temperaturas más altas en comparación con aquellos que contienen solo metano.

Cuando la mezcla de gas contiene un 10% de etano, los hidratos son estables a una presión de 6 atmósferas (equivalente a aproximadamente 60 metros de columna de agua) y una temperatura de 6°C. En cambio, los hidratos de metano puro solo son estables a presiones superiores a 40 atmósferas (alrededor de 400 metros de columna de agua). La profundidad a la que se encuentra la base de los hidratos de gas aumenta con la profundidad del agua.

Para estimar la profundidad de la base de los hidratos de gas, es necesario comprender el régimen de formación de los hidratos en función de la presión y la temperatura. Por lo tanto, al conocer la presión y el gradiente de temperatura en un área determinada, es posible estudiar el régimen de estabilidad de los hidratos de gas en función de la profundidad.

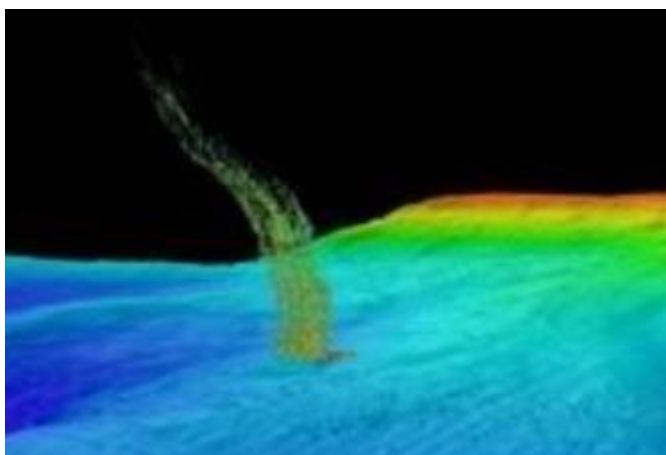


Figura 2.15. El metano atrapado en los fondos marinos, (Philip, B, 2022)

2.11. Estimaciones de los recursos mundiales de metano en los hidratos de gas

Las estimaciones de la cantidad de metano en los hidratos de gas continúan siendo objeto de especulación y presentan un grado de incertidumbre debido a la falta de un conocimiento geológico exhaustivo sobre estos depósitos. Se sabe que los hidratos de gas se distribuyen en todo el mundo, pero aún hay muchas áreas donde el conocimiento de estos depósitos es incompleto o limitado.

Un resumen de estas estimaciones fue presentado por el "Petroleum Gas Committee" en 1981, y reveló un rango significativo en cuanto a la cantidad de gas metano que se cree que está presente en los hidratos de gas. Por ejemplo, se estimó que, en las regiones árticas de permafrost, la cantidad

de gas metano podría alcanzar los $1.4 \times 10^{13} \text{m}^3$, mientras que en los sedimentos no oceánicos esta cifra podría aumentar considerablemente hasta los $7.6 \times 10^{18} \text{m}^3$.

Las estimaciones actuales de la cantidad de gas metano en los depósitos de hidratos de gas varían según diferentes fuentes. Por ejemplo, según Mac Donald en 1990, se estima que hay alrededor de $2.1 \times 10^{16} \text{m}^3$ de gas metano in situ en los hidratos de gas, mientras que Kvenvolden & Claypool en 1988 sugieren una cantidad ligeramente mayor, alrededor de $4 \times 10^{16} \text{m}^3$. Es importante destacar que la mayor parte de estos hidratos de gas se encuentran en los sedimentos de los fondos marinos.

Si estas estimaciones resultan ser precisas, la cantidad de gas metano contenida en los hidratos de gas sería significativamente mayor que el total de metano comercial mundial, que se estima en alrededor de $2.5 \times 10^{14} \text{m}^3$. Además, la cantidad de gas metano en los hidratos de gas representaría aproximadamente el doble del carbono equivalente a todos los depósitos conocidos de combustibles fósiles, incluyendo carbón, petróleo y gas natural (Ladín, 2007).

2.12. Python

2.12.1. Antecedentes de Python

Python tuvo sus inicios a finales de los años 80, cuando fue concebido por el programador holandés Guido Van Rossum mientras se encontraba trabajando en el sistema operativo Amoeba. El primer lanzamiento oficial tuvo lugar el 16 de octubre del año 2000 con Python 2.0. En esta versión, se incorporaron nuevas funciones como la recolección de basura y un soporte Unicode completo. A lo largo del tiempo, Python continuó evolucionando con la introducción de nuevas funciones y características bajo la dirección de Guido.

En reconocimiento a su contribución al software libre, Guido Van Rossum recibió el Premio del Software Libre en el año 2001 por la creación y desarrollo del lenguaje Python. Más tarde, en 2005, fue contratado por Google, donde ha continuado laborando y contribuyendo al desarrollo del lenguaje con diversas actualizaciones y mejoras hasta la actualidad.

2.12.2. Librería Estándar

Una de las principales fortalezas de Python, y posiblemente la más destacada, es su extensa librería estándar. Con decenas de módulos, abarca la mayoría de las necesidades básicas de los

programadores y mucho más. La librería estándar de Python ofrece de manera intuitiva una amplia cobertura en diversos tópicos, que incluyen:

- Manipulación de cadenas de texto
- Estructuras de datos
- Funciones numéricas y matemáticas
- Compresión de datos
- Manipulación de diferentes formatos de archivo
- Criptografía
- Interacción con los servicios del sistema operativo
- Comunicación entre procesos
- Manejo de datos en internet
- Servicios multimedia
- Manejo de excepciones

En total, la referencia de la librería de Python abarca más de 40 tópicos, lo que la convierte en una de las más completas disponibles en la actualidad. Es comparada favorablemente con las librerías estándar de otros lenguajes de programación, como Java y .NET (Ciencias Holguín, abril-junio 2014).

2.12.3. Herramientas de Python

Python es un lenguaje de programación muy importante para el uso de los movimientos tecnológicos por ello este debe contar con un grupo de herramientas donde se facilite su uso y es más fácil de aprender su lenguaje, a continuación, se mencionan algunas herramientas de Python:

- Implementaciones: Python cuenta con varias máquinas virtuales de implementación, una de ellas es CPython esta fue elaborada solamente para el lenguaje C y es una de las más confiables y con mejor rendimiento de trabajo, dentro de las más importantes también se encuentra IronPython, fue creada por .NET, también se encuentra Jython, Pypy que es creada por el mismo Python diseñada para correr varias plataformas.
- Entorno de Desarrollo Integrado: El éxito que ha desarrollado Python ha creado un entorno de diversos desarrollos integrados que cuenten con uno de los mejores servicios de calidad, por ejemplo, IDLE (Integrated DeveLopment Environment) fue creado por Python, IDLE se caracteriza por tener un intérprete al vuelo y debido a que fue desarrollado por Tkinter,

IDLE contiene pequeñas aplicaciones en la cual brinda información a los sistemas operativos, por ejemplo, MacOS, Linux y Windows.

- Servidores de Aplicaciones: En la actualidad la web es un centro digital utilizado por todo el planeta, Python trabaja con un servidor web Apache debido a que fue desarrollado para crear diversos estándares dentro de API Web Server Gateway, también Python tiene sus servidores y aplicaciones los cuales son; Django, TurboGears, Web2py, Pylons y Zope.

Python permite trabajar de forma fácil y organizada manejando diversas ideas, pero de forma algorítmica utilizando sus diversas herramientas y aplicaciones con las que cuenta dentro de un servidor web.

2.13. Geometría de la fractura

2.13.1. Modelos en dos dimensiones (2D)

Los modelos en dos dimensiones nacen en el año 1955 por Howard y Fast, ellos dieron a conocer el primer modelo matemático con el objetivo de ayudar a un ingeniero a poder crear y diseñar un modelo de fracturamiento hidráulico.

El objetivo de los modelos en dos dimensiones es modelar la altura de la fractura, una vez obteniendo este paso se calcula el ancho y su longitud de la misma fractura, el modelo 2D se trabaja de manera confiable debido a que es uno de los más usados para modelar el fracturamiento hidráulico trabajado por un ingeniero.

En la figura 2.16 y la figura 2.17 se mostrará dos de los modelos más comunes para el diseño de fracturamiento hidráulico los cuales son:

- Perkins Kern Norgren (PKN): Este modelo se utiliza cuando la longitud de la fractura es mayor que la altura de la fractura, entonces, el modelo PKN se utiliza para este tipo de diseño de fracturamiento.
- Kristonovich Geertsma Daneshky (KGD): Este modelo es contrario al PKN, debido a que se utiliza cuando la altura de la fractura es mayor que la longitud de la fractura. Ambos modelos tienen el objetivo de calcular los valores para así poder dimensionar el diseño de la fractura.

También el modelo 2D tiene ciertas características para llevar a cabo su diseño una de ellas es que debe ser calibrado con todos los datos de campo para así llevar a cabo un mejor diseño y aumentar la calidad de los tratamientos de estimulación. A continuación, se mostrarán los dos modelos 2D:

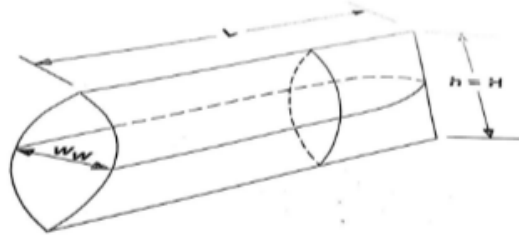


Figura 2.16. Modelo 2D PKN (ResearchGate)

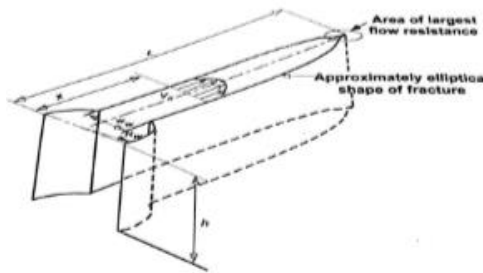


Figura 2.17. Modelo 2D KGD (ResearchGate)

2.14. Modelo en tres dimensiones (3D)

Durante décadas, los modelos en dos dimensiones (2D) han sido desplegados con resultados aceptables. Sin embargo, con el avance de las capacidades computacionales, los modelos tridimensionales (3D) han ganado prominencia. En la mayoría de los casos, los modelos en 3D superan a sus contrapartes 2D, ya que calculan la altura, longitud y ancho de las fracturas mediante la información recopilada de la zona de interés y las capas de roca circundantes, tanto por encima como por debajo del intervalo de perforación.

Clifton ha elaborado una exhaustiva explicación sobre cómo se emplea la teoría de propagación de fracturas para derivar ecuaciones que programan modelos 3D. Las figuras presentadas ilustran resultados típicos obtenidos a partir de estos modelos tridimensionales. Al proporcionar aproximaciones más realistas de la geometría y dimensiones de las fracturas, los modelos en 3D contribuyen a la construcción de modelos y pozos más precisos y eficientes.

La clave para desarrollar un modelo en 3D efectivo reside en la obtención de datos precisos que describan las capas de la formación en las que se llevará a cabo el fracturamiento hidráulico, como señalan Jácome Pazmiño M.A y Muñoz Cabanilla D.F en su estudio de 2016.

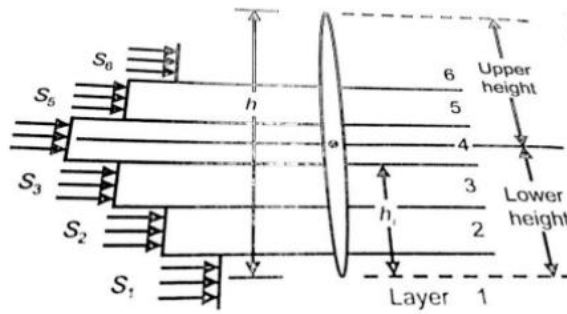


Figura 2.18. Modelo 3D (ResearchGate)

2.15. Ubicación de Hidratos de Metano

En México la industria petrolera ha sido muy importante para el país debido a que es su principal fuente de energía y a su vez importante para la economía del país, por ello es fundamental recurrir a otras alternativas energéticas que proporcionen ayuda para la fuente de producción dentro del país y a nivel mundial durante los presentes años. Por ello en una investigación de SENER, el 1 de enero del año 2015 se realizó un estudio de los yacimientos que aún no se han descubierto y se estiman alrededor de 112,834 MMbpce, el cual se estiman 60,502 MMbpce yacimientos convencional.

2.15.1 Exploración y determinación de los hidratos de metano

Para la exploración de los hidratos de metano se debe llevar a cabo una serie de parámetros para llegar a encontrar y explotar una reserva de estos, por ello se deben cumplir principalmente dos tipos de ambiente, los cuales son:

- Plataformas continentales y estas deben contar con un alto grado de permafrost.
- Cuencas oceánicas que se deben encontrar entre 200 a 4000 m de profundidad y deben contener un alto grado de actividad biológica.

Estos ambientes mencionados son los principales donde podemos encontrar las reservas de hidratos de metano, pero con ciertas condiciones, por ejemplo, que deben estar a cierta profundidad y deben contener actividad biológica, las ciencias más enfocadas al estudio de los hidratos de metano son las siguientes:

- Geofísica
- Geología
- Geoquímica

Estas ciencias han sido muy importantes para el estudio de los hidratos debido a que tienen como objetivo aportar más información y más posibilidades de encontrar las reservas de hidratos y así poder extraerlos para un beneficio para la sociedad.

2.15.2 Ubicación de reservas de hidratos de metano

El Golfo de México, junto con el Mediterráneo, se destaca como uno de los pocos mares periféricos que no dependen exclusivamente del carbono biogénico exportado. En las profundidades del Golfo, entre los 500 y 2,200 metros sobre el talud continental, se han descubierto comunidades bénticas autóctonas que se sostienen gracias al metano y al ácido sulfhídrico. Estas comunidades están asociadas a los fondos de producción de petróleo e hidratos de metano del talud continental en el norte del Golfo de México.

En la Sonda de Campeche, los fondos abisales exhiben un tipo peculiar de vulcanismo generado por la erupción de asfalto, que es lo suficientemente dúctil como para fluir libremente por cientos de metros a lo largo de la pendiente de los domos de sal.

Las estructuras solidificadas de asfalto se asemejan a lava quimioautotrófica y muestran diferencias significativas en su dependencia biogeoquímica en comparación con la fauna de infiltraciones frías descrita en otras partes del océano. Estos descubrimientos, realizados en el año 2003, han permitido identificar un proceso geológico nuevo y una nueva ubicación de depósitos de hidratos de metano, ampliando significativamente la comprensión de la zoogeografía de la fauna quimioautotrófica de mar profundo.

Las formaciones de asfalto fueron documentadas por primera vez en 1971 por Willis Pequegnat en una foto única de un domo salino a 3,325 metros de profundidad (Margarita C, Irene P & Exequiel E. 2004). Estos hallazgos han contribuido de manera significativa al entendimiento de la ecología marina profunda en el Golfo de México y su importancia en el contexto geológico y biológico del océano.

2.15.3 Formación Wilcox

En la cuenca de Burgos, se encuentra una sección que abarca desde el Paleoceno-Tardío hasta el Eoceno-Temprano, específicamente en el área de Arcabuz-Culebra, donde se localiza la formación Wilcox.

Esta formación se divide en dos partes: una correspondiente al Paleoceno, conocida como Wilcox Inferior o Wilcox Paleoceno (WP), y otra del Eoceno, denominada Wilcox Superior o Wilcox Eoceno (WE). Además, presenta estratigrafía de secuencias de 54.2 Ma y 48.5 Ma, respectivamente, según PEMEX (1998). La unidad WP se extiende a lo largo de la sección y se profundiza hacia el este, y está afectada por fallas normales y diapiros de lutita.

La formación Wilcox sobre yace a las unidades PM y LM, y en la zona de esta última muestra una reducción de espesor, probablemente debido a la asimilación o canibalización de una porción de su base que se convierte en parte de la unidad LM. Está por debajo de la unidad WE, pero su parte superior puede estar parcialmente erosionada, lo que la coloca en contacto discordante con la Formación Recklaw. Por su parte, la unidad WE también está afectada por fallas normales y tiene una distribución discontinua en la sección (Figura 2.19). En algunas áreas, no está presente, lo que sugiere que parte o toda ella ha sido removida o erosionada, como en la parte oriental donde es cortada y sobre yacida discordantemente por la Formación Yegua.

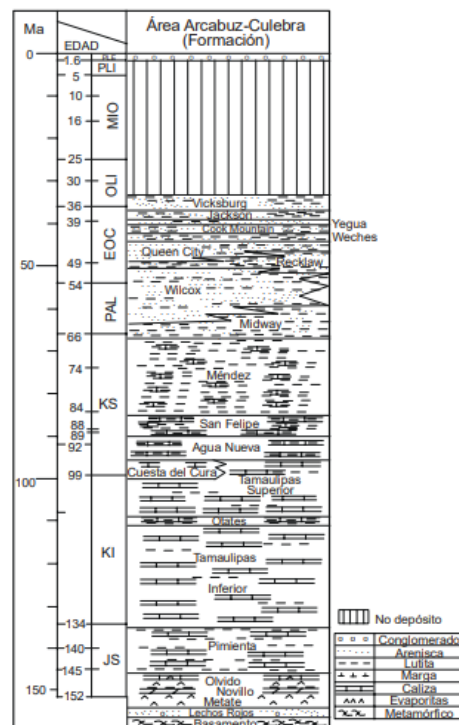


Figura 2.19. Columna estratigráfica compuesta del área Arcabuz–Culebra.
Fuente (Ortiz-Ubilla, 2004)

2.16. Consideraciones geológicas en el estudio de los hidratos de metano

Dentro del análisis de los hidratos de metano nos encontramos con las consideraciones geológicas para llegar a ellos, estas consideraciones nos permiten saber dónde se pueden encontrar las reservas, la geometría de dichos yacimientos y la localización de los hidratos de metano, estas consideraciones son muy importantes para el estudio de los hidratos debido a que nos ofrece información más concreta y con la posibilidad de extraer los hidratos de metano.

Hablando de tipos de ambientes nos lleva a conocer que características geológicas cuenta cada uno de ellos, por lo tanto, saber cuáles son las características que debe tener un ambiente geológico donde se puedan presentar los hidratos, primero que nada, se deben conocer las condiciones tectónicas, las cuales son las siguientes:

- Los márgenes continentales deben ser pasivos estables y pasivos inestables
- Los mares deben estar tectónicamente estables e inestables
- Los límites tectónicos deben ser activos

La formación y acumulación de hidratos de metano están influenciadas por varios factores, incluyendo la roca generadora, la migración del gas, la geología estructural y las características de las rocas o sedimentos que actúan como reservorios. Además, las trampas geológicas juegan un papel crucial en la retención y concentración de estos hidratos. Estas trampas, que generalmente corresponden a anomalías geológicas de origen tectónico, litológico o estratigráfico, proporcionan condiciones favorables para la formación de acumulaciones de hidrocarburos.

Se han identificado tres tipos principales de trampas geológicas que pueden contener hidratos de metano:

- Trampas estructurales: Estas trampas se forman debido a deformaciones en las capas de roca, como pliegues, fallas o domos, que crean espacios cerrados donde el gas puede acumularse y formar hidratos.
- Trampas estratigráficas: Estas trampas se originan debido a cambios en la composición o geometría de las capas de roca, como cambios en la porosidad, la permeabilidad o la presencia de capas sellantes que impiden la migración del gas, lo que permite la acumulación de hidratos.
- Trampas combinadas: Estas trampas son una combinación de trampas estructurales y estratigráficas, donde tanto la configuración geológica como las propiedades de las rocas contribuyen a la retención del gas y la formación de hidratos.

Estos distintos tipos de trampas geológicas proporcionan condiciones propicias para la acumulación de hidratos de metano y son fundamentales para entender la distribución y el potencial de estos recursos energéticos (Vázquez, 2017).

2.16.1. Trampas estructurales

Las trampas estructurales son aquellas que se forman por causa de una deformación estructural en el subsuelo debido a la ocurrencia de un plegamiento, fallas o alguna invasión de sal o arcillas. Existen tres tipos de trampas estructurales, las cuales son:

- Pliegues anticlinales
- Domos
- Fallas normales/inversas

2.16.2. Trampas estratigráficas

Las trampas estratigráficas nos dan a conocer las acumulaciones de los hidrocarburos, pero de forma natural que no haya tenido alguna deformación sobrenatural, las trampas estratigráficas por naturaleza se forman por los cambios litológicos debido a la impermeabilidad que tienen los estratos donde los hidrocarburos quedarán atrapado, pero con una forma lenticular, a continuación, se mostraran algunos ejemplos de trampas estratigráficas:

- Variación por agua subterránea
- Discordancias
- Arrecifes
- Lentes de arena
- Cambio de facies

2.16.3. Trampas mixtas

Las trampas mixtas como su nombre lo mencionan es una combinación entre la formación estructural y los cambios litológicos. En este caso los hidratos de metano.

2.17. Ejemplos de hidratos de metano a nivel mundial.

Actualmente, se han detectado más de 90 sitios en los que se ha encontrado evidencia directa o indirecta de la presencia de estos hidratos, y se estima que estos yacimientos podrían albergar más de 10 billones de metros cúbicos de metano bajo condiciones estándar de presión y temperatura.

Las investigaciones sobre los hidratos de metano no solo se centran en su potencial como fuente de energía, sino que también consideran las implicaciones geológicas y climáticas asociadas con este compuesto. El metano es un gas de efecto invernadero significativamente más potente que el dióxido de carbono, con un potencial de calentamiento global 20 veces mayor. Por lo tanto, comprender el papel de los hidratos de metano en el pasado, presente y futuro es de vital importancia para las investigaciones actuales sobre el cambio climático y la gestión de recursos energéticos.

La importancia de los hidratos de metano a nivel mundial como una fuente alterna de gas natural ha llevado a varios países a desarrollar programas de investigación para evaluar su potencial comercial. Por ejemplo, el Programa de Industria Conjunta (JIP) realizado por Texaco-Chevron tiene como objetivo desarrollar tecnología e información para caracterizar los yacimientos de hidratos de metano en aguas profundas del Golfo de México, específicamente en la zona de Estados Unidos (Figura 2.20). Además, países como Canadá, China, Japón, India y México están implementando proyectos similares para la búsqueda y explotación de hidratos de metano (Vázquez, 2017).



Figura 2.20. Mapa de Boom Energético. Fuente (Vázquez, 2017)

2.18. Diagrama de Katz-Gas

Existen varios métodos empíricos para determinar las condiciones bajo las cuales se forman las hidrataciones del gas natural. Estos métodos utilizan correlaciones simples o gráficas para obtener

estimaciones iniciales de diversas condiciones. Algunos de estos métodos incluyen el de Hammerschmidt (1934), el K-valores (Carson & Katz, 1942), el de McLeod-Campbell (1961), el de Berge (1986), el de Sloan (Kobayashi et al. 1987) .) y el de Motiee (1991).

Para este trabajo es necesario tener en cuenta las condiciones de presión, composición y, en algunos casos, gravedades específicas para determinar la temperatura de formación de los hidratos de gas natural.

2.18.1. Modelos independientes de la gravedad específica

Estos modelos dependen exclusivamente de la presión y la temperatura. Modelo de valor K (Carson & Katz, 1942): Este modelo, desarrollado por Carson & Katz en 1942, fue uno de los primeros enfoques empíricos. Postula que la unidad fundamental del hidrato es una solución sólida, utilizando la constante de equilibrio sólido-vapor para predecir las condiciones de presión y temperatura bajo las cuales se forma el hidrato. Es aplicable a mezclas de gases a presiones inferiores a 7 MPa.

$$\frac{y_i}{x_{i(s)}} = K_{I(V-S)}$$

$$K_{vs-c1} = 1,0 - (0,014 + 15,38/P) \\ * [54,81 - 21,37 * \ln(P) + 2,95 * (\ln P)^2 + (0,014 + 15,38 / P) * T]$$

Fórmula 2.1. Fórmula de Katz-Gas aplicada para el metano

De acuerdo con las diferentes gravedades de los distintos tipos de compuestos en los gases, el diagrama es aplicable para estos mismos, pudiendo hacer una comparativa siendo el metano el de mayor interés.

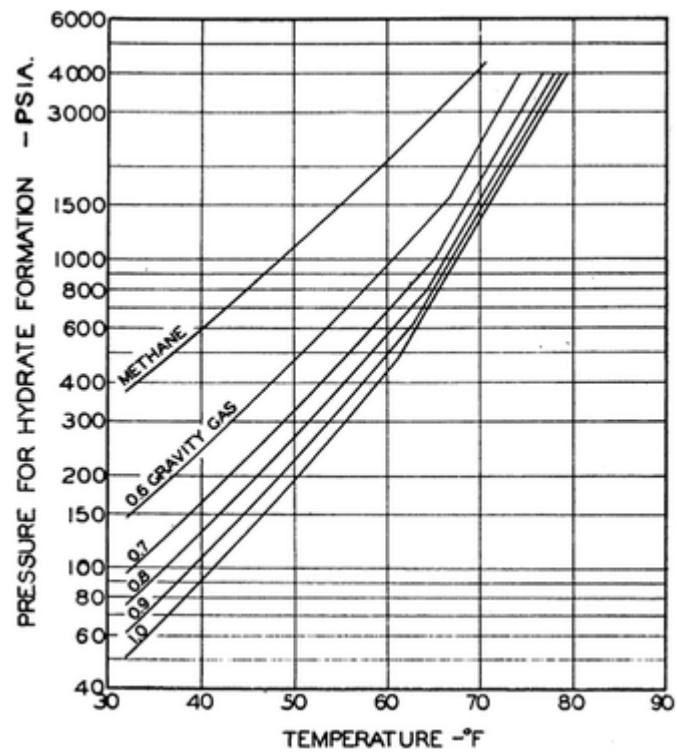


Figura 2.21. Representación de diferentes compuestos en comportamiento de formación de hidratos en diagrama de Katz-Gas (ResearchGate)

Capítulo III. Metodología

1. Identificación de los tipos de hidratos presentes en distintos tipos de yacimientos no convencionales.
 - a. Se investigó a fondo los principales tipos de hidratos presentes en los yacimientos no convencionales, centrándose en una revisión de diversas referencias bibliográficas. Este enfoque permitió obtener una comprensión completa de las características y comportamientos específicos de estos hidratos en contextos no convencionales.
2. Comprensión de la función e impacto del fracturamiento hidráulico en el ecosistema y en la industria.
 - a. Se analizó minuciosamente la variedad de efectos que el fracturamiento hidráulico puede tener tanto en el ecosistema como en la industria. Esta evaluación se basó en la revisión detallada de artículos y tesis que se centran en el impacto de esta técnica. A través de este análisis, se logró obtener una comprensión completa de las diversas implicaciones del fracturamiento hidráulico, proporcionando una visión más detallada de sus consecuencias en el entorno natural y en el sector industrial.
3. Análisis del comportamiento y la naturaleza de los yacimientos no convencionales en aguas profundas del golfo de México.
 - a. Se investigó cómo se están comportando los yacimientos no convencionales dentro de las aguas profundas del Golfo de México en relación con la extracción de hidratos de metano. A través de esta investigación, se busca comprender en detalle los patrones y fenómenos que caracterizan estos yacimientos en un entorno marino, con el objetivo de mejorar la eficacia y sostenibilidad de la extracción de hidratos de metano en esta región específica.
4. Identificación de la ubicación de los distintos yacimientos de hidratos de metano en el Golfo de México.
 - a. Se analizó las distintas ubicaciones en el Golfo de México donde podrían presentarse yacimientos de hidratos de metano. Este análisis permite identificar las áreas específicas con potencial para la existencia de estos depósitos. Al comprender las distintas ubicaciones, se busca optimizar la exploración y extracción de hidratos

de metano en el Golfo de México, teniendo en cuenta las características geográficas y geológicas de cada zona.

5. Creación de un código para facilitar los cálculos que pueden determinar la presencia de hidratos de metano en yacimientos no convencionales en aguas profundas del Golfo de México.
 - a. Se realizó un código para saber la existencia de los hidratos de metano mediante su temperatura y a su vez se dio a conocer si el fracturamiento hidráulico es una técnica viable para la extracción de los hidratos de metano en los yacimientos no convencionales en aguas profundas del Golfo de México.

3.1. Fórmula y constantes

En el presente código, se utilizó la fórmula del libro de GPSA para determinar la presencia de hidratos en el yacimiento, basada en el diagrama de Katz-Gas que describe la relación entre temperatura (T), presión (P) y densidad específica del gas (yg). La fórmula utilizada fue la siguiente:

Fórmula 3.1. Diagrama de KATZ-GAS

$$T = 1 / [A_1 + A_2(\ln y_g) + A_3(\ln P) + A_4(\ln y_g)^2 + A_5(\ln y_g)(\ln P) + A_6(\ln P)^2 + A_7(\ln y_g)^3 + A_8(\ln y_g)^2(\ln P) + A_9(\ln y_g)(\ln P)^2 + A_{10}(\ln P)^3 + A_{11}(\ln P)^4 + A_{12}(\ln y_g)^3(\ln P) + A_{13}(\ln y_g)^2(\ln P)^2 + A_{14}(\ln y_g)(\ln P)^3 + A_{15}(\ln P)^4]$$

Donde:

T: Temperatura (°C)

P: Presión (psia)

yg: Densidad específica del gas

Tabla 3.1. Constantes de la fórmula de Katz-Gas (ResearchGate)

Valores Constantes		
A1 = 2.7707715	A6 = 1.7857444	A11 = 4.6610555
A2 = 2.782238	A7 = 1.130284	A12 = 5.5542412
A3 = -5.649288	A8 = 5.928235	A13 = -1.4727765
A4 = -1.298593	A9 = -2.3279181	A14 = 1.3938
A5 = 1.407119	A10 = -2.6840758	A15 = 1.488501

La fórmula antes dada trabaja de la siguiente manera, la temperatura trabajara de 34 a 60 °F, el rango de la presión de 65 a 1500 Psia y la densidad de cualquier componente tiene un rango de 0.552 a 0.9.

Para lograr mejores resultados y hacer un buen trabajo se estuvo realizando la ecuación en el programa de Python, donde se estaba asignando los valores y constantes de la ecuación, en este caso se estará trabajando con el metano que es el más importante dentro de este proyecto.

3.2. Desarrollo del código

1. **Importación de bibliotecas:** Al principio, se importaron dos bibliotecas importantes para el desarrollo del código: `math` y `matplotlib.pyplot`. La biblioteca `math` se utilizó para realizar operaciones matemáticas, mientras que `matplotlib.pyplot` se empleó para trazar el gráfico.
2. **Definición de la función `calculate_temperature`:** Se definió una función llamada `calculate_temperature` que tomaba dos argumentos: la presión (`p`) y la densidad del gas (`y`). Dentro de esta función, se utilizó una fórmula basada en el diagrama de Katz-Gas para calcular la temperatura del gas. Esta fórmula involucra una serie de constantes (`a1` a `a15`) y operaciones matemáticas como logaritmos.
3. **Solicitud de entrada al usuario:** El código solicita al usuario que ingrese dos valores: la presión de trabajo (`p`) y la densidad del gas (`y`). Estos valores se convirtieron en números de punto flotante para su posterior manipulación.
4. **Cálculo de la temperatura:** Después de obtener los valores de presión y densidad del gas del usuario, se llamó a la función `calculate_temperature` con estos valores como

argumentos. La función calculó la temperatura del gas y devolvió este valor, que luego se imprimió en la consola.

5. **Generación de datos para el gráfico:** Se generaron datos para el gráfico de temperatura en función de la presión. Para ello, se creó una lista de valores de presión (`pressure_values`) multiplicando la presión ingresada (`p`) por los números del 1 al 10. Luego, utilizando estos valores de presión, se calcularon las temperaturas correspondientes (`temperature_values`) utilizando la función `calculate_temperature`.
6. **Trazado del gráfico:** Finalmente, se utilizó la biblioteca `matplotlib.pyplot` para trazar un gráfico de temperatura en función de la presión. Se invirtió el orden de los valores de presión para que el gráfico se visualice correctamente. Se etiquetaron los ejes x e y como 'Presión' y 'Temperatura', respectivamente. Además, se agregó un título al gráfico como 'Diagrama de Katz-Gas' y se mostró la cuadrícula en el gráfico. El gráfico resultante se visualizó en una ventana emergente.

Capítulo IV. Resultados

4.1. Objetivo I. Identificación de los tipos de hidratos presentes en distintos tipos de yacimientos no convencionales

Como resultado del objetivo uno se investigaron los tipos de hidratos que se pueden presentar dentro de los yacimientos, los hidratos se forman mediante la combinación de hidrocarburos en estado gaseoso con agua líquida, solidificándose en formaciones que se encuentran ligeramente por encima del punto de congelación del agua. Este proceso confiere a los hidratos una apariencia similar a la nieve o al hielo, a continuación, se dará a conocer los tipos de hidratos mediante una tabla:

Tabla 4.1. Descripción de características de los diferentes tipos de hidratos. Elaboración propia con datos de Parra (2004).

Tipo de Hidrato	Características
Tipo I	Su formación se basa a las moléculas pequeñas que el propano tratándose de metano, etano y dióxido de carbono
	Se compone de 46 moléculas de agua y por cada ocho moléculas de gas.
	Tiene una estructura cúbica de cuerpo-centrado formado por un dodecaedro pentagonal.
	Es un sólido de doce caras pentagonales.
Tipo II	Se forma cuando los gases llegan a formar estructuras moleculares de tamaño superior al del etano e inferior al del pentano y se definen como propano, iso-butano y n-butano.
	Se compone de 136 moléculas de agua y por cada 24 moléculas de gas.
	Se interpreta como una formación de doce pentágonos y cuatro hexágonos.
	Se caracterizan por ser estructuras únicas en la naturaleza de los hidratos, estas se forman a partir de gases ligeros como lo son el metano y las moléculas pesadas de metilciclopentano, metilciclohexano y ciclooctano.

Tipo H	Se compone a partir de 34 moléculas de aguas por cada 6 moléculas de gas.
	Se interpreta de una formación de doce pentágonos de los cuales se estructuran 3 cuadrados con seis pentágonos y 3 hexágonos que forman un dodecaedro.

Como se mostró anteriormente se observó que existen tres tipos de hidratos de los cuales solo se investigó qué tipo de hidrato se puede presentar dentro de él golfo de México, a consideración que se está trabajando solo con el metano se pueden encontrar únicamente el tipo I, debido a que este se forma a partir de moléculas más pequeñas que el propano y es donde se empiezan a formar los hidratos de metano, etano y dióxido de carbono.

4.2. Objetivo II. Comprensión de la función e impacto del fracturamiento hidráulico en el ecosistema y en la industria

Dentro de la industria petrolera se ha tenido mucha controversia con respecto al Fracturamiento Hidráulico y sus impactos al ecosistema y la industria, por ello se investigó el impacto que este puede llegar a ocasionar. El objetivo "Comprender la función e impacto del fracturamiento hidráulico en el ecosistema y en la industria" se centró en la investigación de conocimientos sobre el proceso de fracturamiento hidráulico, una técnica utilizada en la industria para extraer petróleo y gas de formaciones geológicas. La meta es entender cómo esta técnica afecta tanto al medio ambiente como a la industria petrolera en términos ambientales y sociales. Por ello a continuación se mostrará una matriz de los resultados de la investigación dentro del ecosistema y la industria petrolera (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Matriz de impacto al ecosistema y en la industria.

Actividad	Descripción	Recursos Afectados						Probabilidad		
		Agua	Suelo	Aire	Flora y Fauna	Ruido	Personas	Alta	Media	Baja
Acuíferos por fluidos vertidos	Los fluidos vertidos durante la perforación pueden afectar los mantos acuíferos.								2	
Emisiones a las atmósferas	Esta etapa es la última del proceso del fracturamiento hidráulico donde se liberan									1

	los gases ocasionando efectos de la calidad del aire.									
Contaminación al suelo	Esta etapa se produce a partir por la infiltración de la mezcla del fracturamiento hidráulico una vez terminada la excavación también afecta el centro de la energía global							3		
Repercusiones al paisaje	Debido a las construcciones de las estructuras de él fracturamiento hidráulico puede afectar la tala de árboles, entre otros.							2		
Movimientos sísmicos	Por las fracturas de la técnica del fracturamiento hidráulico puede causar movimientos en las placas tectónicas.							2		
Productos químicos y radioactivos	Los productos químicos utilizados durante la inyección de fluidos no es posible recuperar todos los químicos inyectados.							3		

Como se puede observar en la matriz anterior se dio a conocer los impactos que puede afectar tanto el ecosistema como a la industria, además se muestra la probabilidad de que ocurra el impacto en una categoría de 1 a 3, donde el 1 significa baja probabilidad y 3 alta probabilidad de que ocurra el impacto.

4.3. Objetivo III. Análisis del comportamiento y la naturaleza de los yacimientos no convencionales en aguas profundas del golfo de México.

Dentro del objetivo tres se investigó la naturaleza y el comportamiento de los hidratos de metano en aguas profundas del golfo de México, los hidratos han llamado mucho la atención a los políticos debido a que son una reserva de energía importante para la sociedad, estos se han estado comportando en el fondo marino a unos 150 metros de profundidad hasta cientos kilómetros de las fosas abisales.

4.3.1. Selección del fluido de fracturamiento por medio de tabla comparativa

La selección del fluido de fracturamiento fue abordada a través de la creación de una tabla comparativa. En este enfoque, se consideraron diversos fluidos, como agua, gel a base de agua y aceite, espuma y nitrógeno, esto acorde al tipo de formación, la viscosidad y las condiciones de temperatura y presión. Adicionalmente, se planteó la inclusión de agua caliente para ampliar las opciones disponibles.

En el análisis retrospectivo, se observó que la compatibilidad con la formación, la viscosidad, la capacidad de transporte de propanos y otros factores clave fueron comparados para cada tipo de fluido. Se comparó y determinó que la elección del fluido depende de las características geológicas del yacimiento, las propiedades específicas de cada fluido, así como las condiciones de temperatura y presión en el subsuelo.

El proceso de toma de decisiones se llevó a cabo con un enfoque objetivo, donde se procuró minimizar el daño a la formación y maximizar la eficiencia del fracturamiento. Además, se consideró la aplicación específica de cada tipo de fluido, como fracturas convencionales, acidificación u otras técnicas (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Tabla Comparativa de Selección de Fluido de Fracturamiento. Elaboración propia (Vázquez, 2009)

Características	Agua	Gel Agua Base Aceite	Espuma	Nitrógeno	Agua Caliente
Compatibilidad con la formación	Buena	Buena	Buena	Excelente	Buena
Viscosidad	Baja	Alta	Baja	Baja	Baja
Rompimiento del gel	Si	Requiere aditivos	Rápido	No	Si
Daño a la formación	Posible	Posible	Mínimo	Mínimo	Mínimo
Propanos transportados	Pocos	Altos	Pocos	Pocos	Pocos
Temperatura máxima del yacimiento	N/A	Alta	Moderada	Moderada	Alta
Riesgo de daño por agua	Si	Si	Mínimo	No	Mínimo
Capacidad de transporte de propanos	Limitada	Alta	Limitada	Limitada	Limitada
Eficiencia energética	N/A	Buena	Buena	Excelente	Buena
Aplicaciones comunes	Fracturas	Fracturas, acidificación	Fracturas	Fracturas	Fracturas

4.4. Objetivo IV. Identificación de la ubicación de los distintos yacimientos de hidratos de metano en el Golfo de México.

El programa de investigación Deep Sea Drilling Program (DSDP) documentó dentro del sitio la Zona Económica Exclusiva de México (ZEE) informa que México tiene un gran potencial en contener el recurso de los hidratos de metano. Dentro de la investigación se estima que en las aguas profundas del Golfo de México tiene una gran potencia en hidratos con una cantidad de 60,000 mmbpce, esta cifra dada por Petróleos Mexicanos (PEMEX) del pozo Teca-1 (Figura 4.2) y el pozo Nobilis-1 (Figura 4.1), en el cual están localizados a 220 km de las costas del estado de Tamaulipas.

Pozo Nobilis-101

Ubicación	Golfo de México Profundo
Asignación	AE-0082-3M-Cinturón Plegado Perdido-08
Inicio/Fin de Perforación	24 de diciembre 2016/ 25 de abril de 2017
Inicio/Fin de Terminación	26 de abril de 2017/ 4 de mayo de 2017
Profundidad Total	Vertical: 5,700 m Direccional 6,254 m / 5701 m
Roca almacén	Areniscas de grano fino a muy fino
Edad	Eoceno Inferior Wilcox-100
Resultado	Productor de aceite
Tipo de Hidrocarburo	Aceite de 40 ° API

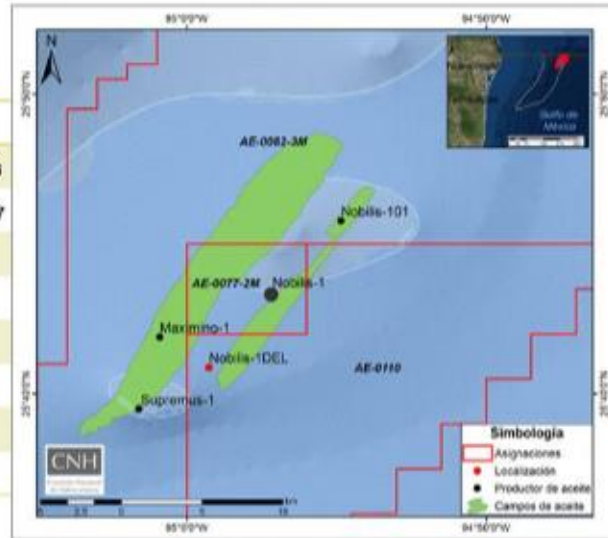


Figura 4.1. Ficha técnica Pozo Nobilis-101

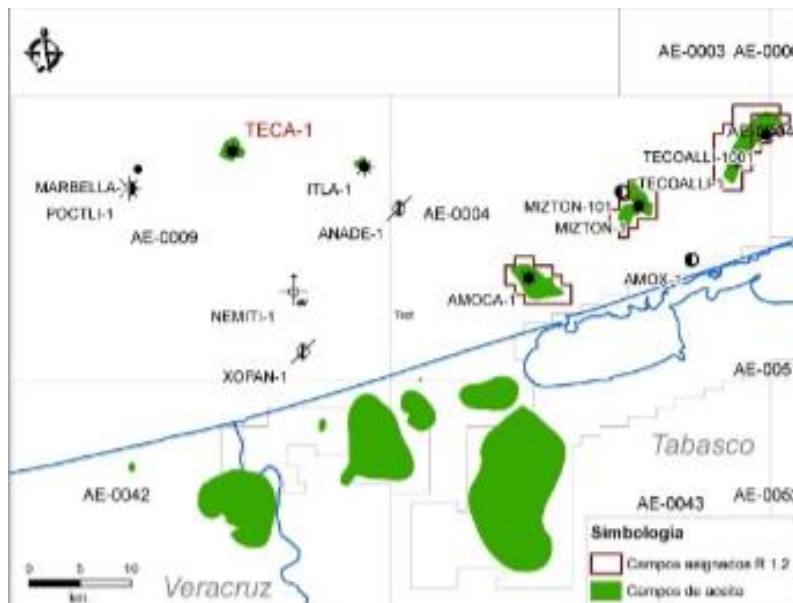


Figura 4.2. Ubicación Teca-1

4.5. Objetivo V. Creación de un código para facilitar los cálculos que pueden determinar la presencia de hidratos de metano.

Partiendo del concepto tomado previamente en la metodología, el ingreso de los valores constantes establecido por las fórmulas es el primer factor considerado para calcular

```
import math
import matplotlib.pyplot as plt

# Función para calcular la temperatura según el diagrama de Katz-Gas
def calculate_temperature(p, y):
    a1 = 0.0027707715
    a2 = -0.002782238
    a3 = -0.005649288
    a4 = -0.001298593
    a5 = 0.001407119
    a6 = 0.001785744
    a7 = 0.001130284
    a8 = 0.0005928235
    a9 = -0.00023279181
    a10 = -0.0026840758
    a11 = 0.0046610555
    a12 = -0.00055542412
    a13 = -0.000014727765
    a14 = 0.000013938082
    a15 = 0.000001488501
```

La fórmula adaptada al código se desarrolla para conocer la temperatura y presión adecuada en la cual se forman los hidratos de metano dentro del yacimiento.

```
t = 1 / (((a1 + a2) * (math.log(y))) + (a3 * (math.log(p))) + (a4
* ((math.log(y)) ** 2)) + (a5 * (math.log(y)) * (math.log(p))) + (a6
* ((math.log(p)) ** 2)) + (a7 * ((math.log(y)) ** 3)) + (a8 *
((math.log(y)) ** 2) * (math.log(p))) + (a9 * (math.log(y)) *
((math.log(p)) ** 2)) + (a10 * (math.log(p) ** 2)) + (a11 *
((math.log(p)) ** 4)) + (a12 * ((math.log(y)) ** 3)) + (a13 *
((math.log(y)) ** 2) * (math.log(p))) + (a14 * (math.log(y)) *
((math.log(p)) ** 3)) + (a15 * ((math.log(p)) ** 4)))
return t
```

Para este punto es requerido ingresar los datos de presión y de la densidad del gas que se trabaje, en este caso, es metano, cuya densidad es de 0.657; la presión estará acorde a las limitantes establecidas o para las condiciones a las que se contemplen casos experimentales.

```
# Datos de entrada del usuario
p = float(input("Agregue la presión de trabajo: "))
y = float(input("Agregue la densidad del gas: "))

# Calcular temperatura
t = calculate_temperature(p, y)
print("La temperatura es:", t)
```

La gráfica se genera a partir de la presión proporcionada por el usuario y la temperatura incrementa acorde al incremento de esta en la gráfica en relación con la densidad del gas.

```
# Generar Datos para graficar
pressure_values = [p * i for i in range(1, 11)] # valores de presión
de p a 10p
temperature_values = [calculate_temperature(pressure, y) for pressure
in pressure_values]

# Generación del gráfico
plt.plot( pressure_values [::-1], temperature_values )
plt.xlabel('Presión')
plt.ylabel('Temperatura')
plt.title('Diagrama de Katz-Gas')
plt.grid(True)
plt.show()
```

Finalmente, los resultados indican la precedencia de hidratos debido al incremento de la presión y la disminución parcial de la temperatura con relación a la densidad del gas metano presente en un potencial yacimiento.

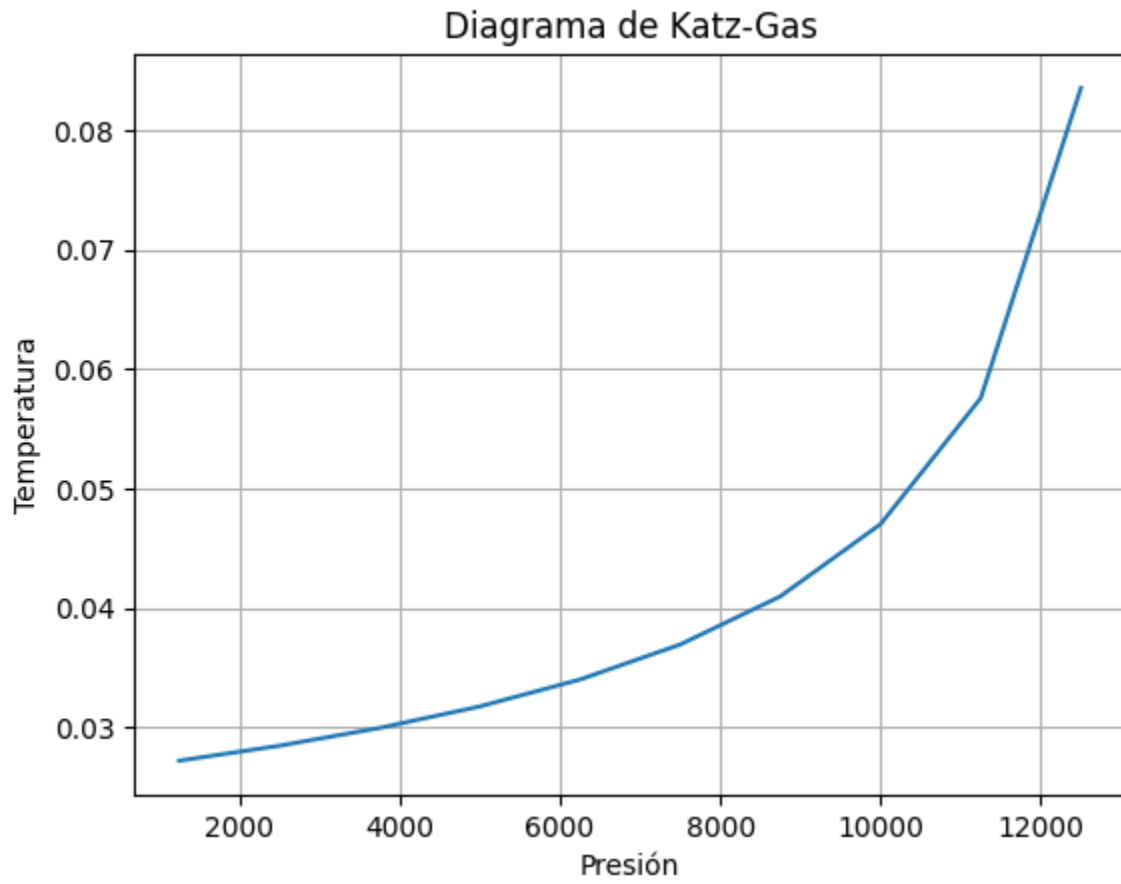


Figura 4.3. Resultado gráfico del código en representación de la temperatura de formación de hidratos

Conclusiones

- En el transcurso de esta investigación centrada en el análisis del fracturamiento hidráulico en yacimientos de hidratos de metano como una forma no convencional de extracción en aguas profundas del Golfo de México, se ha logrado avanzar significativamente hacia el cumplimiento de los objetivos establecidos.
- El objetivo general de este estudio, que , se analizó la metodología aplicada en la explotación de hidratos de metano en el Golfo de México y entender el comportamiento de estos frente al fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales, ha sido abordado de manera sistemática a través de objetivos específicos que han guiado cada etapa de la investigación.
- Se ha identificado la diversidad de hidratos presentes en distintos tipos de yacimientos no convencionales, proporcionando una base sólida para comprender la función e impacto del fracturamiento hidráulico tanto en el ecosistema como en la industria, como se planteó en el segundo objetivo específico.
- La naturaleza y comportamiento de los yacimientos no convencionales en aguas profundas del Golfo de México han sido objeto de un análisis detallado, permitiendo así avanzar hacia una comprensión más profunda de las complejidades asociadas con este tipo de yacimientos, cumpliendo con el tercer objetivo específico.
- Adicionalmente, se ha desarrollado un código en el lenguaje de programación Python para determinar la temperatura del yacimiento, un factor crítico en la predicción de la presencia de hidratos de metano. Este enfoque técnico, que utiliza la ecuación de Katz-Gas, demuestra un paso fundamental hacia la implementación de métodos eficientes para la extracción de hidratos de metano mediante el fracturamiento hidráulico.
- El desarrollo y aplicación del código en Python, basado en la ecuación de Katz-Gas, se revela como un componente esencial en la consecución de los objetivos de esta tesis. Al utilizar este código, hemos logrado determinar la temperatura del yacimiento, un factor crítico para la predicción de la formación de hidratos de metano. La interacción de variables como la presión y la densidad del gas, junto con las constantes proporcionadas en el código, ha permitido obtener resultados que constituyen un avance significativo en el entendimiento de las condiciones necesarias para la formación de hidratos en yacimientos no convencionales.

- La hipótesis, que postula la posibilidad de analizar e interpretar métodos óptimos y eficientes para la extracción de hidratos de metano mediante fracturamiento hidráulico, ha encontrado respaldo en la evidencia proporcionada por el código en Python.
- La fragilidad de los cristales de hidratos de metano, que históricamente ha presentado un desafío en términos de costos de extracción, se ve abordada por la eficacia potencial del fracturamiento hidráulico. Este método, que implica la inyección controlada de fluidos a alta presión para inducir fracturas en la formación rocosa, podría representar una solución viable para superar las barreras económicas asociadas con la extracción de hidratos de metano.
- En este sentido, la temperatura del yacimiento, determinada a través del código en Python, se posiciona como un factor clave para evaluar la viabilidad del fracturamiento hidráulico. Los resultados obtenidos proporcionan una retroalimentación valiosa sobre cómo este método podría ser implementado de manera eficiente, minimizando los costos y maximizando la extracción de hidratos de metano.
- La convergencia de los resultados obtenidos a través del análisis de la metodología de fracturamiento hidráulico en yacimientos de hidratos de metano y la implementación del código en Python para la determinación de la temperatura del yacimiento ha generado una perspectiva integral sobre la viabilidad de este enfoque en aguas profundas del Golfo de México.
- La identificación de las condiciones específicas que propician la formación de hidratos de metano, a través de la ecuación de Katz-Gas, establece una base sólida para el diseño de estrategias de extracción eficientes. La temperatura del yacimiento se erige como un indicador crucial, y los resultados arrojados por el código en Python ofrecen información que puede ser empleada para optimizar las operaciones de fracturamiento hidráulico.
- La hipótesis inicial, que sugería la posibilidad de utilizar el fracturamiento hidráulico como una herramienta efectiva en la extracción de hidratos de metano, se ve respaldada por la evidencia recopilada a lo largo de este estudio. Los obstáculos tradicionales asociados con la fragilidad de los cristales de hidratos de metano y los costos de extracción pueden mitigarse mediante un enfoque cuidadosamente diseñado y basado en datos precisos de temperatura y presión.

- En términos prácticos, los hallazgos de esta investigación tienen implicaciones significativas para la industria energética y la exploración de recursos en aguas profundas. La implementación estratégica del fracturamiento hidráulico podría abrir nuevas posibilidades para la explotación responsable de hidratos de metano, diversificando las fuentes de energía y contribuyendo a la seguridad energética a largo plazo.

Recomendaciones

Basando las conclusiones obtenidas de esta investigación centrada en el análisis del fracturamiento hidráulico en yacimientos de hidratos de metano en aguas profundas del Golfo de México, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Continuar la Investigación: Dado el avance significativo logrado en este estudio, se recomienda continuar la investigación en este campo para profundizar en la comprensión de la viabilidad y efectividad del fracturamiento hidráulico en la extracción de hidratos de metano. Esto podría incluir investigaciones adicionales sobre la interacción entre la temperatura del yacimiento, la presión y otros factores clave en la formación de hidratos.
- Refinamiento del Código en Python: Es crucial seguir refinando el código en Python desarrollado para determinar la temperatura del yacimiento. Esto implica la incorporación de datos adicionales y la validación continua de los resultados obtenidos mediante la comparación con mediciones de campo y otros métodos de estimación de temperatura.
- Evaluación de Impacto Ambiental: Antes de proceder con la implementación a gran escala del fracturamiento hidráulico en yacimientos de hidratos de metano, se recomienda realizar una evaluación exhaustiva del impacto ambiental. Esto debe incluir el análisis de posibles efectos sobre el ecosistema marino, la calidad del agua y otras consideraciones ambientales relevantes.
- Desarrollo de Estrategias Operativas: Se sugiere desarrollar estrategias operativas específicas para la aplicación del fracturamiento hidráulico en yacimientos de hidratos de metano. Esto implica considerar aspectos técnicos, económicos y ambientales para optimizar las operaciones de extracción y minimizar cualquier impacto negativo.
- Colaboración Interdisciplinaria: Dada la complejidad asociada con la extracción de hidratos de metano mediante fracturamiento hidráulico, se recomienda fomentar la colaboración interdisciplinaria entre expertos en geología, ingeniería de petróleo, ciencias ambientales y

otras disciplinas relevantes. Esta colaboración puede facilitar un enfoque integral para abordar los desafíos y maximizar los beneficios de esta técnica de extracción.

- Marco regulatorio: Es esencial establecer un marco regulatorio sólido y actualizado que guíe la implementación del fracturamiento hidráulico en yacimientos de hidratos de metano. Este marco regulatorio debe abordar aspectos relacionados con la seguridad operativa, la protección ambiental y el cumplimiento de normativas internacionales y locales.
- Promoción de la conciencia pública: Se sugiere promover la conciencia pública sobre el fracturamiento hidráulico en yacimientos de hidratos de metano, destacando tanto los posibles beneficios como los riesgos y desafíos asociados. La transparencia y la comunicación efectiva son fundamentales para ganar el apoyo de la comunidad y garantizar un desarrollo responsable de esta técnica de extracción.

En conjunto, estas recomendaciones pueden servir como guía para avanzar de manera efectiva en la aplicación del fracturamiento hidráulico en yacimientos de hidratos de metano en aguas profundas del Golfo de México, asegurando un equilibrio adecuado entre el aprovechamiento de recursos y la protección del medio ambiente.

Referencias

- Marshall, P. A. (2002). Los hidratos de metano. Petrotecnia, AAG. Argentina
- Reyes Lobato E. (2016) La prueba minifrac como herramienta básica para tomar decisiones en el fracturamiento hidráulico en un pozo petrolero. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
- Luna García C. (2014) Manejo de agua en un fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales de lutitas. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
- Parra, E. (2004) HIDRATOS DE GAS: UN NUEVO RECURSO ENERGÉTICO DE VENEZUELA. Caracas
- Hidalgo Bermeo, L.P. (2020) Fracturamiento Hidráulico Aplicado a Yacimientos No Convencionales.
- Comisión Nacional de Hidrocarburos (2019) El fracturamiento hidráulico es una técnica de producción de uso intensivo en campos de gas. CNH
- Ladín Sandoval, V.J. (2007) Importancia de los Hidratos de Metano como Fuente de Energía. Instituto Tecnológico de Aguascalientes.
- Osorio Chávez, F.P. (2020) Estudio de métodos de explotación de yacimientos de hidratos de gas como futuro uso de recurso energético. Universidad Estatal Península de Santa Elena. La Libertad, Ecuador.
- Gil Sánchez, J.C. y Rojas Parra, F.I. (2008) Métodos Usados en la Formación de Gas Natural en Formaciones de Hidratos de Lechos Marinos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- Caso, M; Pisanty, I; Exequiel, E. (2004) Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies.
- Feng, Y; Chen, L; Suzuki, A; Kogawa A. (2019) Enhancement of gas production from methane hydrate reservoirs by the combination of hydraulic fracturing and depressurization methods. Institute of Fluid Science, Tohoku University. Sendai 9808577, Japón.
- Konno, Y; Jin, Y. (2016) Hydraulic Fracturing in Methane-Hydrate-Bearing Sand. Research Institute of Energy Frontier (RIEF), Japan.
- Pérez López H. (2018) Estudio del proceso de formaciones de hidratos de metano para emulsiones agua/aceite + tensoactivo. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México.

Pinzón, A; Lasso, D; Vergel, M; Sierra, L. (2013) Generalidades del Fracturamiento Hidráulico. Universidad Industrial de Santander.

Suess, E; Bohrmann, G; Greinert, J; Lausch, E. (2000) Hielo Inflamable. Investigación y Ciencia.

Culquicondor Huacchillo, E.A. (2022) Aplicación de Gas Caliente para Eliminar la Formación de Hidratos en el Sistema de Gas Lift en el Lote Z1. Universidad Nacional de Piura.

Hassanpouryouzband, A. (2020) Gas hydrates in sustainable chemistry. Royal Society of Chemistry

Largo Villegas, G.D. (2018) Estudio De Pre-Factibilidad Para Selección De Inhibidores De Baja Dosis Para El Control De La Formación De Hidratos En El Transporte De Gas. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Carrillo, G; Guerrero, P. (2013) Cálculo de Propiedades del Gas Natural. Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería. República Bolivariana de Venezuela.

Dean, J. F., Middelburg, J. J., Röckmann, T., Aerts, R., Blauw, L. G., Egger, M., Dolman, A. J. (2018) Methane Feedbacks to the Global Climate System in a Warmer World. The Netherlands and Denmark.

Caballero, A. y Pérez, P.J. (2014) El metano como materia prima: un reto vigente. Universidad de Huelva.

Valdes Aguirre, C.L. (2018) El Fracking: Impactos ambientales y socioeconómicos. Doctorado en Medio Ambiente Dimensiones Humanas Socioeconómicas.

Rodriguez, A. y Javier, F. (2010) Propiedades físicas: Densidad y porosidad. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo.

Vélez, L. M. (2010). Permeabilidad y porosidad en concreto. TecnoLógicas.

FAO Training (s. f.-b). 9. PERMEABILIDAD DEL SUELO. Recuperado 21 de noviembre de 2022, de https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm

Nardone, Virna, Müller, María, Bouza, Alexis, Sánchez, Yamilet, & Montbrun, Jenny. (2009). Evaluación de modelos empíricos para la predicción de hidratos de gas natural. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 24(3), 21-31. Recuperado en 20 de febrero de 2024, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652009000300002&lng=es&tlng=es.

New predictive method for estimation of natural gas hydrate formation temperature using genetic programming - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Katzs-diagram-for-estimation-of-hydrate-formation-conditions-in-different-gas-gravities_fig1_320450418 [accessed 5 Mar, 2024]

Vázquez Cárdenas J.F. (2009) MEJORAMIENTO DE LA CONDUCTIVIDAD EN EL FRACTURAMIENTO HIDRAULICO. UNAM