

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA PETROLERA**



PROYECTO DE GRADO

**“PREDICCIÓN DE FORMACIÓN DE HIDRATOS EN TUBERÍAS DE GAS
NATURAL APLICANDO LA TEORÍA DE TRANSICIÓN DE RÉGIMEN DE
FLUJO”**

POSTULANTE: UNIV. RICALDI MEDINA RUDDY ARIEL

TUTOR: M. SC. ING. SERGIO EDDY VISCARRA ORTUÑO

La Paz Bolivia

2023



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por iluminar y guiar mi camino y en cada paso durante toda la vida.

A mis padres por ser el pilar fundamental en mi vida, por la educación que me han impartido y enseñarme buenos valores, hoy por hoy todo lo alcanzado es gracias a ellos.

A la Universidad Mayor de San Andrés, por haberme dado la oportunidad de educarme en sus prestigiosas aulas y finalizar mi carrera.

A los docentes de la Carrera Ingeniería en Petrolera, quienes me aconsejaron he impartieron sus conocimientos durante la etapa Universitaria.

Finalmente, a mis Amigos por brindarme su ayuda y su apoyo en los momentos más difíciles de la etapa Universitaria.

DEDICATORIA

A Dios por guiar mi camino, mantener a mi Familia Unida y con salud. A mis padres Yolanda Medina R. y Tito Modesto Ricaldi Ch. quienes se esforzaron día a día para darme la mejor educación y darme la mano para lograr ser un profesional. A mi hermano Kevin Kenny Ricaldi Medina quien forma parte de mi vida y me ayuda a salir en momentos difíciles. A mi familia y a mis seres queridos que ya se fueron a la gloria de Dios, quiénes me bendicen y estarían felices por haberme visto terminar esta esta etapa de mi vida.

INDICE

SIMBOLOGÍA.....	1
RESUMEN EJECUTIVO	2
1 CAPÍTULO I: GENERALIDADES	3
1.1 INTRODUCCIÓN.	3
1.2 ANTECEDENTES	3
1.2.1 Antecedentes del GAA (Gasoducto al altiplano)	3
1.2.2 Antecedentes académicos	5
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	5
1.3.1 Identificación del problema.	5
1.3.2 Formulación del problema.	7
1.4 OBJETIVOS	7
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.5 JUSTIFICACIÓN.	8
1.5.1 Justificación técnica.....	8
1.5.2 Justificación teórica	8
1.5.3 Justificación económica.....	8
1.5.4 Justificación socio – ambiental	9
1.6 ALCANCE	9
1.6.1 Alcance temático.	9
1.6.2 Alcance geográfico.	10
1.6.3 Alcance temporal.....	10
2 CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	12
2.1 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS....	12

2.1.1	Generalidades	12
2.1.2	Fluido.....	12
2.1.3	Gas.....	12
2.1.4	Gasoducto	13
2.2	FORMACIÓN DE HIDRATOS	14
2.3	INHIBICIÓN DE HIDRATOS	14
2.3.1	Control de temperatura.....	15
2.3.2	Control de presión	15
2.3.3	Remoción de agua	15
2.3.4	Adición de inhibidores químicos	15
2.3.5	Inhibidores cinéticos	16
2.4	MODELOS TRADICIONALES PARA LA PREDICCIÓN DE FORMACIÓN DE HIDRATOS DE GAS NATURAL	17
2.4.1	Modelos dependientes de la gravedad específica.....	17
2.4.2	Modelos independientes de la gravedad específica	19
2.5	MODELOS DE FLUJO PARA FORMACIÓN DE HIDRATOS	21
2.5.1	Modelo de Flujo monofásico.....	21
2.5.2	Modelo de flujo multifásico	22
2.5.3	Enfoque de modelo de flujo multifásico transitorio en tuberías	22
2.6	DEFINICIÓN DEL MODELO	24
2.6.1	Modelo de cinética de hidratos transitorios	24
2.6.2	Ecuación de conservación de energía de la mezcla.....	26
2.6.3	Modelo final propuesto	33
3	CAPÍTULO III: MARCO REFERENCIAL	35
3.1	CARACTERÍSTICAS DEL GASODUCTO.....	35

3.1.1	Parámetros actuales.....	35
3.1.2	Parámetros operativos	36
3.1.3	Resumen de características por tramo:.....	38
3.1.4	Tramo Sica Sica – Senkata.....	39
3.1.5	Variables operativas de los loops.....	39
3.2	MÉTODOS PARA EVITAR EL RIESGO DE FORMACIÓN DE HIDRATOS EN LOS LOOPS.....	41
3.2.1	Métodos para ubicar al Punto de Operación en una Región sin Riesgo de Hidratos:	41
3.2.2	Inhibidores termodinámicos.....	42
4	CAPITULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA.....	43
4.1	ANÁLISIS DE TRANSICIÓN DE RÉGIMEN DE FLUJO EN EL GASODUCTO GAA.....	43
4.1.1	Incremento del espesor interno	43
4.1.2	Masa extraída de hidratos por limpieza se obtienen las siguientes tablas: 45	
4.1.3	Espesor del depósito de hidratos a lo largo de la tubería para diferentes niveles de saturación de agua.	50
4.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	50
4.3	OBTENCIÓN DE DEFORMACIÓN DE ALTURAS DE HIDRATOS CON LA ECUACIÓN PARAMÉTRICA EN EL DUCTO.....	53
5	CAPÍTULO V: MARCO PROPOSITIVO	59
5.1	DEFINICIÓN DEL PROGRAMA DE CONTROL DE HIDRATOS CON LOS RESULTADOS DEL MODELO	59
5.1.1	Objetivos del programa	59
5.2	DESARROLLO DEL PROGRAMA.....	59
5.2.1	Plantilla métrica de calidad del Gasoducto.....	59

5.2.2	Línea de base de calidad	63
5.2.3	Matriz de actividad de calidad	64
5.2.4	Política de control de calidad.....	66
5.2.5	Proceso para corregir problemas de formación de hidratos	68
6	CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA	72
6.1	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA	72
6.1.1	Análisis FODA	72
6.2	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA	73
6.2.1	Costos fijos.....	73
6.2.2	Costos Variables sin control predictivo de hidratos	74
6.2.3	Estudio de TIR y VAN con formación descontrolada de hidratos	75
6.2.4	Análisis de costo y beneficio sin control de hidratos.....	78
6.2.5	Resumen de las variables de rentabilidad.....	79
6.2.6	Análisis de sensibilidad con formación descontrolada de hidratos....	80
6.2.7	Costos Variables con formación de hidratos controlada.....	81
6.2.8	Estudio de TIR y VAN con predicción controlada de formación de hidratos	81
6.2.9	Análisis de costo y beneficio	84
6.2.10	Resumen de las variables de rentabilidad.....	84
6.2.11	Análisis de sensibilidad con pérdidas controladas de líquido	85
7	CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
7.1	CONCLUSIONES.....	86
7.2	RECOMENDACIONES	87
8	BIBLIOGRAFÍA.....	88
9	ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo I:

Figura 1. 1: Diagrama de causa y efectos de Ishikawa.....	6
Figura 1. 2: Área de aplicación del proyecto	10

Capítulo II:

Figura 2. 1: Instalación típica de un gasoducto (Gasoducto GAA).....	13
Figura 2. 2: Hidratos de gas natural	14
Figura 2. 3: Sección transversal de la tubería con flujo uniforme estratificado régimen	25

Capítulo IV:

Figura 4. 1: Sección de formación de hidratos	43
Figura 4. 2: Cantidad de hidratos extraída en casa tramo del gasoducto GAA....	47
Figura 4. 3: Crecimiento del hidrato dentro de cada ducto.....	52
Figura 4. 4: Tasa de crecimiento de hidrato dede 2021	54
Figura 4. 5: Tasa de crecimiento de hidrato hasta 2022	55

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo III:

Tabla 3. 1: Características gasoducto al Altiplano GAA.....	38
Tabla 3. 2: Tercer tramo en estudio	39
Tabla 3. 5: Características de funcionamiento de los loop.....	40
Tabla 3. 6: Gráfica de un loop del gasoducto GAA	40

Capítulo IV:

Tabla 4. 1: Cantidad en kilogramos de la masa obtenida al mes, Tramo 1 - 4.....	45
Tabla 4. 2: Cantidad en kilogramos de la masa obtenida al mes, Tramo 5 - 8.....	46
Tabla 4. 4: Incrementos para cada tramo	50

Capítulo V:

Tabla 5. 1: Plantilla métrica de calidad del Gasoducto.....	59
Tabla 5. 2: Línea de base de calidad	63
Tabla 5. 3: Matriz de actividad de calidad	64
Tabla 5. 4: Política de control de calidad	66
Tabla 5. 5: Proceso para corregir problemas de formación de hidratos	68

Capítulo VI:

Tabla 6. 1 Análisis FODA.....	72
Tabla 6. 2 Análisis de costos fijos	74
Tabla 6. 3 Costos variables.....	74
Tabla 6. 4 Flujo de caja con formación de hidratos descontrolada	76
<i>Tabla 6. 5 Iteración del TIR.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 6. 6 Interpretación de Costo y beneficios</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 6. 7 Parámetros económicos.....</i>	<i>80</i>
Tabla 6. 8 Costos variables con control de formación de hidratos	81
Tabla 6. 9 Flujo de caja con predicción controlada de formación de hidratos	82
<i>Tabla 6. 10 Iteración del TIR con proyecto propuesto.....</i>	<i>83</i>

Tabla 6. 11 Parámetros económicos con predicción controlada de formación de hidratos 84

ÍNDICE DE ECUACIONES

Capítulo II:

Ecuación 2. 1: Modelo de Berge	18
Ecuación 2. 2: Modelo de Berge B.....	18
Ecuación 2. 3: Modelo de Motiee	18
Ecuación 2. 4: Modelo de K-valores.....	19
Ecuación 2. 5: Modelo de K-valores para el metano.....	19
Ecuación 2. 6: Modelo de K-valores para el metano si $K_{ns} - c_1$ es mayor a 1.....	19
Ecuación 2. 7: Modelo de K-valores para el etano.....	20
Ecuación 2. 8: Modelo de K-valores para el propano.....	20
Ecuación 2. 9: Modelo de K-valores para el iso butano	20
Ecuación 2. 10: Modelo de K-valores para el n-butano.....	20
Ecuación 2. 11: Modelo de K-valores para el dióxido de carbono.....	20
Ecuación 2. 12: Modelo de K-valores para el nitrógeno.....	21
Ecuación 2. 13: Gradiente de presión suponiendo un flujo en estado estacionario	21
Ecuación 2. 14: Balance de cantidad de movimiento en estado estacionario	22
Ecuación 2. 15: Ecuación de conservación de masa para la fase gaseosa	23
Ecuación 2. 16: conservación de masa para la película líquida	23
Ecuación 2. 17: Conservación de masa para gotas de líquido.....	23
Ecuación 2. 18: Conservación del momento lineal para la fase gaseosa	24
Ecuación 2. 19: Tasa de formación de hidratos	24
Ecuación 2. 20: Área de la sección transversal de la capa de agua	25
Ecuación 2. 21: Relación entre la retención de agua (H_w) y el ángulo húmedo ...	26
Ecuación 2. 22: función de retención de líquido.....	26
Ecuación 2. 23: Superficie del área entre el agua y el gas	26
Ecuación 2. 24: Balance de energía en términos de la entalpía de pseudofase ...	27
Ecuación 2. 25: Naturaleza exotérmica de la reacción de formación de hidratos .	27
Ecuación 2. 26: densidad media de la mezcla dentro del ducto	28
Ecuación 2. 27: Velocidad promedio.....	28

Ecuación 2. 28: Entropía en función de la presión y la temperatura	28
Ecuación 2. 29: Entalpía específica	28
Ecuación 2. 30: Primera ley de la termodinámica	29
Ecuación 2. 31: Primera ley de la termodinámica modificada.....	29
Ecuación 2. 32: Relación termodinámica deducida	29
Ecuación 2. 33: Relación de Maxwell.....	29
Ecuación 2. 34: Variación de la entalpía	30
Ecuación 2. 35: Ecuación con respecto a la presión que da una entalpía constante	30
Ecuación 2. 36: Variación de la entalpía en función del coeficiente de Joule- Thomson.....	30
Ecuación 2. 37: Ecuación de balance de energía en términos de temperatura	30
Ecuación 2. 38: Coeficiente β	31
Ecuación 2. 39: Calor específico.....	31
Ecuación 2. 40: Coeficiente de Thomson.....	31
Ecuación 2. 41: Coeficiente de Joule-Thomson para la fase de agua líquida.....	31
Ecuación 2. 42: Balance de energía en términos de temperatura simplificado	31
Ecuación 2. 43: Balance de energía en términos de temperatura discreta	32
Ecuación 2. 44: Balance de energía en términos de temperatura discreta B.....	32
Ecuación 2. 45: Balance de energía en términos de presión y velocidad	33
Ecuación 2. 46: Tasa de consumo de gas durante la formación de hidratos en sistemas dominados por agua	33
Ecuación 2. 47: Área superficial de agua por unidad de volumen para flujo estratificado.....	34
Ecuación 2. 48: Densidad de hidrato	34
Ecuación 2. 49: Masa de hidrato.....	34
Ecuación 6. 1: Ecuación del VAN.....	75
Ecuación 6. 2: Ecuación del TIR	78
Ecuación 6. 3: Relación de Costo y Beneficio.....	79

SIMBOLOGÍA

DPI	Indicador de Presión Diferencial
FD	Detector de Fuego
FE	Medidor de Flujo
GD	Detector de Mezcla Explosiva
LC	Control de Nivel
LCV	Válvula de Control de Nivel.
LG	Visor de Nivel.
LS	Switch de Nivel
LSH	Switch de Nivel Alto
LSL	Switch de Nivel Bajo
LT	Transmisor de Nivel
PCV	Válvula de Control de Presión.
PI	Indicador de Presión
PIT	Transmisor Indicador de Presión.
TI	Indicador de Temperatura.

RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto tiene como objetivo predecir la cantidad de hidratos que se forman a lo largo de un gasoducto ya que los métodos convencionales no determinan el total en un ducto sino por un volumen determinado de gas. Este proyecto de grado se utilizan ecuaciones diferenciales dependientes del crecimiento y las características geométricas del ducto para poder determinar el volumen y masa que se forma para mejorar los periodos de limpieza y eliminación de cualquier material que perjudique el transporte del gas. En la primera parte del proyecto se explica detalladamente los conceptos fundamentales del fenómeno físico de la formación de hidratos en gasoductos.

Después, se desarrolla el modelo integral de cinética de hidratos y transición de régimen de flujo para predecir la formación y transportabilidad de hidratos en sistemas de ductos dominados por gas. Con este mismo modelo desarrollado se logra predecir cuándo y dónde se formarán tapones de hidratos en determinados tramos de ductos de gas con el modelo propuesto.

En la parte práctica se logra simular geoméricamente los mecanismos de formación y transportabilidad de hidratos en gasoductos a través del análisis de datos con un programa desarrollado en macros Excel.

Al realizar el estudio de factibilidad técnica se puede afirmar de que el proyecto tiene más ventajas que desventajas y eso es bueno a nivel industrial y posteriormente económicamente el proyecto es factible ya que no existe muchos costos en el análisis y los costos operativos son menores. De esta forma puede confirmar que se logró predecir la formación de hidratos en tuberías de gas natural aplicando la teoría de transición de régimen de flujo.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN.

La deposición de hidratos de gas, ceras, asfaltenos y escamas minerales, obstruyen las líneas de flujo, impidiendo el flujo normal y generando un peligro para la seguridad (Kaczmariski y Lorimer, 2001).

La formación de hidratos de gas se genera por condiciones operativas de alta presión y baja temperatura que se presenta más que todo en zonas frías y es considerada como uno de los problemas en el transporte de hidrocarburos más desafiantes (Sloan, 2005).

Por el momento solo se llegó a predecir la formación de hidratos con modelos termodinámicos los cuales no son muy exactos para estimar el riesgo de taponamiento cualitativos para su tratamiento que son económicamente inviables como ser la inyección térmica y de otros compuestos químicos. El modelo de hidratos de gas ayuda a optimizar el flujo y mejorar los procedimientos de operación. y considera los mecanismos transitorios de flujo. Al predecir la formación y transportabilidad de los hidratos de gas, el modelo integral se puede aplicar en el diseño y la optimización de las instalaciones de transporte de petróleo/gas, centrándose en la prevención, gestión o remediación de los hidratos de gas en las líneas de flujo. Por tanto en este proyecto se controlará la formación de hidratos utilizando un software basado en los modelos anteriormente mencionados.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Antecedentes del GAA (Gasoducto al altiplano)

El proyecto GAA inició el año 2010 y consistió en la Ingeniería procura y Construcción de dos loops (parelelas) de cañería de doce pulgadas de diámetro con

una extensión de 15 kilómetros en el tramo Sica Sica – Senkata y de 36 kilómetros en el segmento Huayñakota – Parotani.

El tramo Parotani-Pongo fue realizado por la empresa IST, mientras que el tramo Sica-Sica - Senkata fue ejecutado por la empresa Servipetrol. La supervisión del tramo de 36 kilómetro estuvo a cargo de la empresa Bolpegas mientras que el tramo de 15 kilómetros fue realizada por la empresa DESC, todas empresas bolivianas. Las ampliaciones realizadas en el GAA, promueven el desarrollo de los sectores industriales, domiciliarios, GNV y la generación termoeléctrica, para los departamentos de Oruro y La Paz y garantizan el suministro de gas natural en este parte del mercado nacional.

El Gasoducto al Altiplano ha costado \$us 29 millones Desde mediados de julio de 2020 el Gasoducto Al Altiplano tiene una nueva capacidad de transporte de 76,3 millones de pies cúbicos día para entregas de volúmenes de gas al mercado interno, tras la conclusión y habilitación del proyecto de expansión “GAA Fase IV-Etapa 2” de YPFB Transporte, subsidiaria de YPFB Corporación.

Con respecto a la demanda, la capacidad de transporte del Gasoducto Al Altiplano sigue por encima de lo que demanda el mercado interno. El nivel máximo de la demanda conjunta de los departamentos de La Paz y Oruro y la ciudad de El Alto es inferior a los 60 millones de pies cúbicos día, en tanto que el gasoducto puede transportar hasta 76,3 millones de pies cúbicos día.

El Gasoducto Al Altiplano opera en conexión con el Gasoducto Carrasco-Cochabamba (GCC) y es el que suministra el gas natural a los departamentos de La Paz y Oruro y la ciudad de El Alto. Asegura el abastecimiento de gas para los requerimientos de sus diversos sectores: domiciliario, vehicular, industrial y termoeléctrico

1.2.2 Antecedentes académicos

Luis Guevara & Alexis Bouza con su trabajo de investigación denominado “Evaluación de modelos rigurosos para la predicción de hidratos de gas natural”, evaluaron siete modelos rigurosos para la predicción de formación de hidratos de distintos sistemas de hidrocarburos, desde mezclas con un solo hidrocarburo hasta mezclas multicomponentes en un amplio rango de temperatura y presión. Todo esto con la finalidad de poder evaluar los modelos rigurosos y determinar cuál arroja la menor desviación con respecto a los datos experimentales.

Rubio (2020), en su proyecto de investigación “Modelo matemático para predecir condiciones de formación de hidratos de gas natural”, utilizó la ecuación de estado de Peng Robinson¹ para el cálculo de fugacidades y trató de relacionar el gasto de metanol a través de este modelo para inhibir una determinada cantidad de hidrato que se forme en el transporte de gas natural.

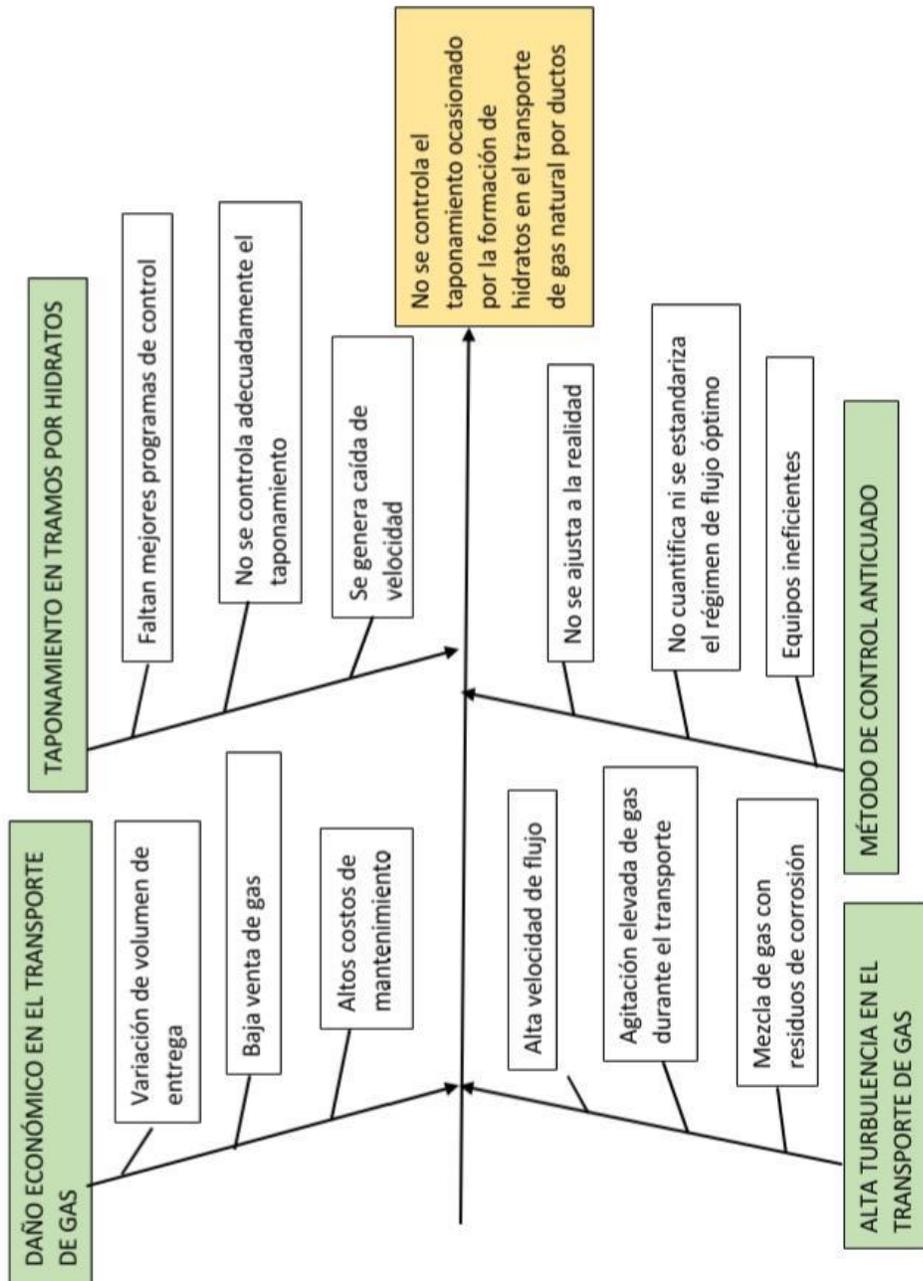
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.3.1 Identificación del problema.

La formación de hidratos se genera principalmente por el incremento de la turbulencia en el transporte de gas que no es controlado debidamente ya que no se puede tener parámetros Y actualmente la empresa a cargo solo utiliza parámetros que se controlan con el barómetro y con el valor del caudal pero no se consideran variables como la transición de flujo. Otra característica del problema, es que no se están considerando una investigación profunda para estudiar este comportamiento y no se tiene rangos adecuados para el control. El resumen de causas y consecuencias que producen el problema se presenta a continuación en el siguiente diagrama de ishikawa.

¹ La ecuación de Peng-Robinson es la más ampliamente usada en termodinámica de Ingeniería Química. Se sabe que proporciona unas predicciones mejores para densidades de líquidos que la ecuación de Soave-Redlich-Kwong por Soave (1972)

Figura 1. 1: Diagrama de causa y efectos de Ishikawa



Fuente Elaboración propia, 2023

Según el anterior diagrama se puede concluir que no se controla adecuadamente el taponamiento ocasionado por la formación de hidratos en el transporte de gas natural por ductos.

1.3.2 Formulación del problema.

En función a la anterior identificación del problema se puede plantear la siguiente pregunta de investigación para llevar a cabo el proyecto de grado:

- ¿De qué manera se podrá predecir la formación de hidratos en tuberías de gas natural?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Predecir la formación de hidratos en tuberías de gas natural aplicando la teoría de transición de régimen de flujo.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Explicar los conceptos fundamentales del fenómeno físico de la formación de hidratos en gasoductos.
- Desarrollar un modelo integral de cinética de hidratos y transición de régimen de flujo para predecir la formación y transportabilidad de hidratos en sistemas de ductos dominados por gas.
- Predecir cuándo y dónde se formarán tapones de hidratos en determinados tramos de ductos de gas con el modelo propuesto.
- Simular los mecanismos de formación y transportabilidad de hidratos en gasoductos a través del análisis de datos con un programa desarrollado en macros Excel.

- Realizar un estudio de factibilidad técnico y económico del proyecto planteado.

1.5 JUSTIFICACIÓN.

1.5.1 Justificación técnica.

.Al considerar los periodos de formación de hidratos en los gasoductos y predecir los puntos de taponamiento se podrá facilitar el trabajo de mantenimiento de estos sistemas dentro el área de prevención y corrección y también facilitar el flujo de gas dentro los gasoductos. La herramienta será muy útil para el personal y el equipo encargado de control de hidratos ya que podrá ajustarse a periodos de trabajo y trabajar dentro ciertos rangos de velocidad, presión y temperatura.

1.5.2 Justificación teórica

El proyecto es muy importante e interesante ya que se aplicará a detalle áreas que se han llevado dentro de la materia de termodinámica y operaciones unitarias de manera superficial, y acá se detallará con más profundidad. Por otra parte, también se está demostrando la aplicación del software HYSYS que es de mucha exigencia en el mercado laboral y también demuestra que nuestra universidad está preparada para manejar este tipo de aplicaciones digitales en la industria petrolera.

1.5.3 Justificación económica.

Todo sistema de transporte necesita cumplir con normas preventivas y correctivas para su mantenimiento y que este pueda funcionar y operar de manera normal y continua en el tiempo, lo cual; sí este sistema presenta errores se incrementan los procesos de mantenimiento y por ende Los costos operativos. Un sistema cuantitativo de control permitirá cuantificar los periodos de mantenimiento Y ya que se conocerán los periodos de formación de hidratos y también los parámetros para

que se generen estos evitando el despilfarro Y gasto de dinero en el mantenimiento de gasoductos.

1.5.4 Justificación socio – ambiental

La implementación de un sistema automático que prediga el incremento y presencia de puntos de taponamiento causado por hidratos necesita de un equipo profesional con alta preparación en análisis cuantitativo del transporte de hidrocarburos y especialistas en la detección de zonas de taponamiento, por lo cual; la propuesta de control genera fuentes de empleo para nuevos profesionales e investigadores que se dediquen a este tipo de control para evitar todo tipo de daños y problemas en el transporte de gas.

Muy aparte, la implementación de estos sistemas evitarán problemas en la formación de hidratos y darán buen aspecto a la empresa ya que no habrán quejas por parte de los usuarios y se evitarán de todo tipo de problemas en el futuro y también se evita accidentes que afecten al medio ambiente.

1.6 ALCANCE

1.6.1 Alcance temático.

El presente proyecto analiza la predicción de la formación de hidratos en gasoducto GAA aplicando la teoría de flujo transitorio, lo cual aplica la materia de transporte de hidrocarburos, operaciones unitarias y también la materia de simulación numérica. Se aplican otras áreas anexas como ser la teoría cinética de los gases y la transición de flujo que genera la formación de hidratos cuando existe turbulencia en un fluido. Cabe recalcar, que el proyecto ya no aplica los modelos convencionales de hidratos y solo se darán referencias superficiales². Por otra parte, se desarrolla una pequeña

² Más información se encuentra en la revista de investigación vol 28, titulada “Evaluación de modelos rigurosos para la predicción de hidratos de gas natural.”

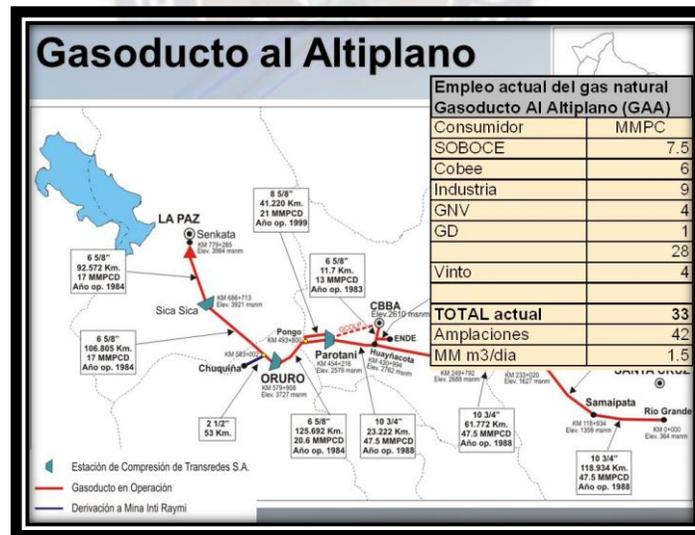
simulación aplicando el software de Macros Excel para analizar la parte de eficiencia y rendimiento de esta propuesta.

1.6.2 Alcance geográfico.

El proyecto sistema de transporte de gas natural de YPFB TRANSPORTE S.A. se extiende sobre dos tercios del país abarcando 7 de los 9 Departamentos. El presente proyecto abarcará los departamentos de Cochabamba, Oruro y La Paz por el motivo que el gasoducto de abastecimiento occidental, gasoducto al altiplano (GAA) pasa por los departamentos ya nombrados anteriormente.

Desde la estación de medición de Parotani - estación de medición en Oruro, cuenta con 125,692 km de extensión. Las coordenadas son: Latitud: 18°11'35" Longitud: 62°54'6" Altitud: 341.6 msnm.

Figura 1. 2: Área de aplicación del proyecto



Fuente: YPFB, Transporte, 2022

1.6.3 Alcance temporal.

Para la realización del presente proyecto se tomará un tiempo de 3 meses a partir de este mes del año 2022 con datos históricos desde enero de 2021 hasta diciembre

de 2022. El proyecto se comienza en el mes de abril diseñando el perfil por abril y terminando de defender todo el proyecto hasta el mes de julio.



CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

2.1.1 Generalidades

En el mundo del petróleo los oleoductos y los buques tanqueros son los medios por excelencia para el transporte del crudo. El paso inmediato al descubrimiento y explotación de un yacimiento es su traslado hacia los centros de refinación o a los puertos de embarque con destino a exportación.

En suma, el transporte de petróleo tiene dos momentos netamente definidos: el primero es el traslado de la materia prima desde los yacimientos hasta la refinería donde finalmente será procesada para obtener los productos derivados; el siguiente momento es el de la distribución propiamente dicha, cuando los subproductos llegan hasta los centros de consumo.

2.1.2 Fluido

El estado de un fluido es un estado particular de agregación que está determinado por la temperatura y presión a la que existe, los hidrocarburos son un ejemplo claro de ello. (Mott, 2007)

2.1.3 Gas

En los gases ideales el volumen ocupado por sus propias moléculas, es tan insignificante respecto al volumen total, que la atracción intermolecular es mínima bajo cualquier condición (P, T), para el estudio de los gases ideales nos basamos en varias generalizaciones que ayudan a darnos una idea de la conducta gaseosa.

En los gases reales el producto PxV_{no} es constante debido a la influencia de la presión, los gases reales tienen dos comportamientos diferentes. El factor que corrige este comportamiento en los gases reales y los lleva a condiciones ideales es el conocido como Factor de Compresibilidad del gas "Z".

2.1.4 Gasoducto

Un gasoducto es una tubería muy extensa y de gran grosor que permite transportar un gas combustible a través de una larga distancia. Es habitual que el gasoducto se inicie en un yacimiento natural y luego se dirija hacia un centro de distribución.

También llamado gaseoducto, un gasoducto posibilita que el gas circule a alta presión. Por lo general, los gasoductos son tuberías que se entierran a una profundidad de entre 1 y 2 metros. En algunos casos, sin embargo, estas tuberías se desarrollan sobre la superficie. (Pérez, 2018)

Figura 2. 1: Instalación típica de un gasoducto



Fuente: Los tiempos.com, 2011

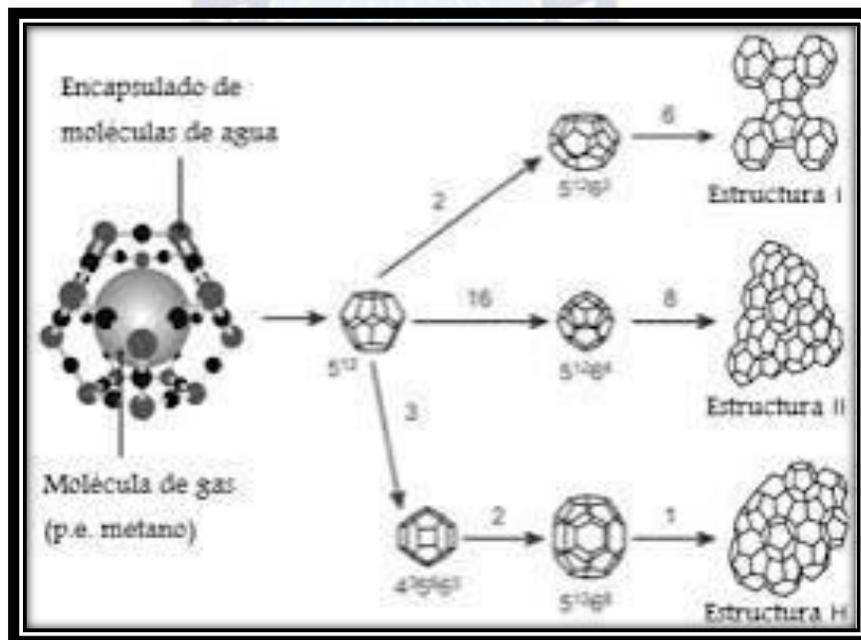
Aunque las normativas que regulan su creación y su funcionamiento pueden variar según el país, los gasoductos deben respetar diversos criterios por motivos de seguridad. La instalación de válvulas que permitan interrumpir el flujo cada ciertos

intervalos en caso de accidente (como puede ser una fuga que afecte negativamente la presión de gas) y de sensores que puedan detectar eventuales fugas y la creación de estaciones de compresión son algunas de las medidas habituales. (Pérez, 2018)

2.2 FORMACIÓN DE HIDRATOS

Los hidratos de gas natural son compuestos de inclusión que se forman en presencia de gases de bajo peso molecular y agua, a altas presiones y bajas temperaturas, que pueden bloquear gasoductos y oleoductos. (Nardone, Müller, Bouza, Sánchez, Montbrun, 2009)

Figura 2. 2: Hidratos de gas natural



Fuente: Nardone, Müller, Bouza, Sánchez, Montbrun, 2009

2.3 INHIBICIÓN DE HIDRATOS

Las estrategias para inhibir los hidratos generalmente consisten en modificar una o varias de las condiciones necesarias para su formación a fin de desestabilizar el hidrato (Pickering et al. 2001), entre ellas se encuentran:

2.3.1 Control de temperatura

Uno de los métodos más empleados para prevenir la formación de los hidratos consiste en mantener la temperatura del fluido de producción por encima de la temperatura de formación del hidrato; ello se logra con el calentamiento o recubrimiento de tuberías en los procesos de operación o transporte.

2.3.2 Control de presión

Para evitar el riesgo de la formación de los hidratos se debe mantener la presión de operación del sistema suficientemente baja; sin embargo, este método no resulta adecuado en condiciones normales de operación ya que las presiones que se requieren para el transporte de los fluidos de producción generalmente son bastante elevadas.

2.3.3 Remoción de agua

Otro de los métodos empleados es la deshidratación o secado del gas, eliminando agua de las corrientes a partir de la reducción del punto de rocío del vapor de agua, en el flujo de gas, por debajo de la temperatura de operación.

2.3.4 Adición de inhibidores químicos

Otro método adoptado especialmente por las industrias de gas y petróleo para prevenir o controlar la formación de los hidratos consiste en la inyección de inhibidores químicos (Koh et al. 2002). El inhibidor, al ser agregado en grandes cantidades, altera las condiciones de formación de los hidratos hacia mayores presiones y menores temperaturas.

Existen tres clases principales de inhibidores químicos: inhibidores termodinámicos, inhibidores cinéticos, e inhibidores antiaglomerantes. Estos dos últimos son también

llamados inhibidores de dosis baja, pues la dosis necesaria es pequeña comparada con la de inhibidores termodinámicos (Pickering et al. 2001):

2.3.4.1 Inhibidores termodinámicos

Esta clase de inhibidores es capaz de alterar el potencial químico de la fase acuosa, de forma tal que la curva de equilibrio de disociación se desplace hacia temperaturas aun menores y presiones mayores. Los mismos se añaden en concentraciones relativamente altas, aproximadamente entre 10 y 60% en peso en fase acuosa (Lovell & Pakulski, 2003).

Los inhibidores de este tipo más comúnmente usados son: metanol, el cual representa un inhibidor bastante demandado debido a su efectividad y bajos costos; el monoetilenglicol (MEG), así como también algunas sales inorgánicas que se forman de manera natural en agua de mar (Pickering et al. 2001).

Los mismos actúan disminuyendo la fugacidad del agua en sus fases coexistentes, lo que hace que el hidrato se forme a temperaturas menores y presiones mayores.

2.3.5 Inhibidores cinéticos

Este tipo de inhibidores no altera la termodinámica de formación del hidrato, por el contrario, modifica la cinética de formación y se basa en la inyección de productos químicos a base de polímeros (Huo et al. 2001).

Su efecto depende del tiempo de residencia, pues los hidratos se formarán y bloquearán las tuberías únicamente si el tiempo de paso por la tubería es suficientemente largo. A diferencia de los inhibidores termodinámicos, estos se agregan en bajas concentraciones, generalmente menos de 1% en peso en fase acuosa (Pickering et al. 2001).

2.3.5.1 Anti-aglomerantes

Esta clase de productos químicos no previene la formación de los hidratos de gas; sin embargo, buscan evitar la aglomeración de los cristales que podrían bloquear las tuberías. Estos químicos se adhieren al cristal del hidrato y lo estabilizan. Se aplican en dosis bajas, típicamente menor a 1% en peso en la fase acuosa, así como también se requiere de la existencia de una fase condensada (Pickering et al. 2001).

2.4 MODELOS TRADICIONALES PARA LA PREDICCIÓN DE FORMACIÓN DE HIDRATOS DE GAS NATURAL

Los modelos empíricos se basan en correlaciones o métodos gráficos sencillos de manejar que permitan obtener estimados iniciales de las condiciones de formación de hidratos. En la literatura consultada para la realización de este trabajo se encontraron diversos métodos empíricos aplicables para gases dulces y gases ácidos, entre ellos, el método de Hammerschmidt (1934), el método de K-valores (Carson & Katz, 1942), el método de McLeod-Campbell (1961), el método de Berge (1986), el método de Sloan (Kobayashi et al. 1987), y finalmente, el método de Motiee (1991).

Es importante destacar que para este trabajo se parte de las condiciones de presión y composición, así como también de las gravedades específicas (en caso de ser necesario) para verificar la temperatura de formación.

2.4.1 Modelos dependientes de la gravedad específica

Los modelos empíricos composicionales dependientes de la gravedad específica son los modelos desarrollados por Berge (1986), Sloan (Kobayashi et al. 1987), y Motiee (1991):

2.4.1.1 Modelo de Berge (1986)

Se distinguen dos ecuaciones explícitas en temperatura según el rango de gravedad específica de la mezcla gaseosa. Se recomienda la aplicación de ambas ecuaciones para temperaturas comprendidas entre 273,2 y 299,8 K y presiones entre 276 y 30337 kPa. Para gravedad específica entre 0,555 y 0,579:

Ecuación 2. 1: Modelo de Berge

$$T = -96,03 + 25,37 * \ln P - 0,64 * (\ln P)^2 + \left(\frac{\gamma_g - 0,555}{0,025} \right) * [80,61 * P + 96,03 - 25,37 * \ln P + 0,64 * (\ln P)^2]$$

Para gravedad específica entre 0,580 y 1,000:

Ecuación 2. 2: Modelo de Berge B

$$(T = \left[80,61 * P - 2,1 * 10^4 - \frac{1,22 * 10^3}{\gamma_g - 0,535} - \left(1,23 * 10^4 + \frac{1,71 * 10^3}{\gamma_g - 0,509} \right) \right] * \left(P + 260,42 + \frac{15,18}{\gamma_g - 0,535} \right)^{-1})$$

2.4.1.2 Modelo de Motiee (1991)

Este modelo requiere del ajuste de seis constantes a través de una regresión similar a la desarrollada para el modelo de Sloan (Kobayashi et al. 1987). El mismo es aplicable para temperaturas mayores a 288,7 K, presiones mayores a 14 MPa y gravedades específicas menores a 0,650.

Ecuación 2. 3: Modelo de Motiee

$$(T = b_1 + b_2 * \log P + b_3 * (\log P)^2 + b_4 * \gamma_g + b_5 * \gamma_g^2 + b_6 * \gamma_g * \log P)$$

2.4.2 Modelos independientes de la gravedad específica

A continuación, se presentan correlaciones, que a diferencia de las mencionadas anteriormente, dependen únicamente de la presión y de la temperatura:

2.4.2.1 Modelo de K-valores (Carson & Katz, 1942)

Este modelo fue uno de los primeros modelos empíricos y que fue desarrollado por Carson & Katz en 1942. Supone que la unidad básica del hidrato es una solución sólida, por lo que emplea la constante de equilibrio sólido-vapor para predecir las condiciones de presión y temperatura a las que el hidrato se forma. Es aplicable a mezclas de gases a presiones menores de 7 MPa.

La constante de equilibrio sólido-vapor para el componente i se define como:

Ecuación 2. 4: Modelo de K-valores

$$\frac{y_i}{y_{i(s)}} = K_i(v - s)$$

Para el metano:

Ecuación 2. 5: Modelo de K-valores para el metano

$$k_{ns} - c_1 = 1.0 - \left(0.014 + \frac{15.38}{P}\right) * [54.81 - 21.37 * \ln P] + 2.9 * \ln [(P)^2]] \\ + (0.0014 + 15.38/P) * T$$

Si $K_{ns} - c_1$ es mayor a 1, se aplica la siguiente ecuación:

Ecuación 2. 6: Modelo de K-valores para el metano si $K_{ns} - c_1$ es mayor a 1

$$K_{ns} - c_1 = 1,01 + \frac{9,31}{T} - \frac{1614,16}{T_2} + 625,57 - 3,3 * T + 0,023 * \frac{T_2}{P} + -3,79 * 10^4 \\ + 2,09 * \frac{106}{T} - 9,82 * \frac{107}{T_2} + 1,54 * \frac{109}{P_2 T_3}$$

Para el etano:

Ecuación 2. 7: Modelo de K-valores para el etano

$$K_{ns - c2} = \exp \left(29,91 + \frac{2779,25}{P} - \frac{60251,4}{P_2} \right) * T \left(6,94 - \frac{471,93}{P} \right)$$

Para el propano:

Ecuación 2. 8: Modelo de K-valores para el propano

$$K_{ns - c3} = 0,094 + \frac{21,76}{P} - \frac{4039,48}{P_2} + \frac{2,44 \times 10^5}{P_3}$$

Para el iso-butano:

Para $P \leq 4,1$ MPa:

Ecuación 2. 9: Modelo de K-valores para el iso butano

$$K_{ns - ic4} = -2,22 \cdot 10^{-6} + 6,99 \cdot 10^{-3} / P + 0,74 / P_2 \cdot \exp [T \cdot (0,14 + 1,88 / P)]$$

Para n-butano:

Para $P \leq 4,1$ MPa:

Ecuación 2. 10: Modelo de K-valores para el n-butano

$$K_{ns - c4} = 0,25 - 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot P + (-6,85 \cdot 10^{-4} + 3,34 \cdot 10^{-5} \cdot P) \cdot T$$

Para el dióxido de carbono:

Ecuación 2. 11: Modelo de K-valores para el dióxido de carbono

$$K_{ns - co2} = -0,025 + 194,99 / P - 1,08 \cdot 10^5 / P_2 + (-4,29 + 269,82 / P - 2,38 \cdot 10^6 / P_2) / [T + (-57,03 - 4,99 \cdot 10^{-3} \cdot P)]$$

Para el nitrógeno:

Ecuación 2. 12: Modelo de K-valores para el nitrógeno

$$K_{ns - N2} = 0,823 + \frac{530,65}{P - 478,637}$$

2.5 MODELOS DE FLUJO PARA FORMACIÓN DE HIDRATOS

2.5.1 Modelo de Flujo monofásico³

El enfoque del modelo de fluido homogéneo supone que el flujo de dos fases se puede tratar como un flujo de una sola fase mediante el uso de propiedades promedio para la mezcla.

La ecuación de gradiente de presión suponiendo un flujo en estado estacionario:

Ecuación 2. 13: Gradiente de presión suponiendo un flujo en estado estacionario

$$\frac{dp}{dx} = -\tau_{pared} \frac{\pi D}{A_p} - \rho g \text{Sen} \theta - \rho v \frac{dv}{dt}$$

Donde:

p es la presión

x es la coordenada axial a lo largo de la tubería

τ_{pared} es el esfuerzo cortante de la pared

D es el diámetro interno de la tubería

A_p es el área de la sección transversal de la tubería

ρ es la densidad del fluido

θ es el ángulo de la tubería de inclinación con respecto a la horizontal

v es la velocidad lineal del fluido.

³ En el desarrollo del proyecto se explicará con más detalle

2.5.2 Modelo de flujo multifásico

En el enfoque del modelo de flujo separado, supone que las fases gaseosa y líquida fluyen en conductos separados con un área de sección transversal igual al área ocupada por las fases.

Las ecuaciones de balance de cantidad de movimiento en estado estacionario se escriben para las fases gaseosa y líquida:

Ecuación 2. 14: Balance de cantidad de movimiento en estado estacionario

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\tau_{w,k}P_k + \tau_i P_i}{A_k} - \rho_k g \sin\theta$$

Donde:

$\tau_{w,k}$ es el esfuerzo cortante de la pared de la fase k, evaluado asumiendo flujo monofásico en un conducto con área de sección transversal igual al área ocupada por la fase (A_k),

P_k es el perímetro mojado de la fase k

τ_i es el esfuerzo cortante interfacial

P_i es el ancho de la interfaz plana entre las fases.

El enfoque de modelado de flujo transitorio de dos fases implica la solución simultánea de ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía para cada fase (gas y líquido), y utiliza correlaciones empíricas y relaciones constitutivas simplificadas para parámetros de flujo, como fricción interfacial, fracción de líquido arrastrado en la fase de gas libre, y retención de líquido en el cuerpo del bloque.

2.5.3 Enfoque de modelo de flujo multifásico transitorio en tuberías

Los enfoques de modelado de flujo de dos fases anteriores usaban correlaciones empíricas separadas para el régimen de flujo, la retención de líquido y el factor de

fricción, pero es importante tener en cuenta que estos parámetros están físicamente interrelacionados.

Durante el desarrollo de los modelos de flujo transitorio de dos fases, se intenta unificar el tratamiento de la retención de líquido, la caída de presión y los regímenes de flujo, como parte integral del modelo (Bendiksen et al., 1991).

El enfoque de modelado transitorio de dos fases implica la solución simultánea de ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía para cada fase (gas y líquido), y utiliza correlaciones empíricas y relaciones constitutivas simplificadas para parámetros de flujo, como fricción interfacial, fracción de líquido arrastrado en la fase de gas libre y retención de líquido en el cuerpo del bloque. Bendiksen.

La ecuación de conservación de masa para la fase gaseosa es

Ecuación 2. 15: Ecuación de conservación de masa para la fase gaseosa

$$\frac{\partial}{\partial t}(H_g \rho_g) = -\frac{1}{A_p} \frac{\partial}{\partial x}(A_p H_g \rho_g v_g) + \psi_g + S_g$$

Para la película líquida, la ecuación de conservación de masa es

Ecuación 2. 16: conservación de masa para la película líquida

$$\frac{\partial}{\partial t}(H_L \rho_L) = -\frac{1}{A_p} \frac{\partial}{\partial x}(A_p H_L \rho_L v_L) + \psi_g \frac{H_L}{H_L + H_D} - \psi_e + \psi_d + S_L$$

La ecuación de conservación de masa para gotas de líquido es

Ecuación 2. 17: Conservación de masa para gotas de líquido

$$\frac{\partial}{\partial t}(H_D \rho_L) = -\frac{1}{A_p} \frac{\partial}{\partial x}(A_p H_D \rho_L v_D) + \psi_g \frac{H_L}{H_L + H_D} + \psi_e - \psi_d + S_D$$

Donde:

Las fases se denotan con los subíndices g, L y D para gas, película líquida y gotitas de líquido, respectivamente

S_k es el término fuente/sumidero externo de la fase k

ψ_g es la tasa de transferencia de masa entre las fases líquida y gaseosa

ψ_e es la tasa de arrastre de gotas de líquido en la fase gaseosa

ψ_d es la tasa de deposición de gotitas de líquido en la fase líquida.

La ecuación de conservación del momento lineal para la fase gaseosa es

Ecuación 2. 18: Conservación del momento lineal para la fase gaseosa

$$\frac{\partial}{\partial t}(H_g \rho_g v_g) = -H_g \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{A_p} \frac{\partial}{\partial x}(A_p H_g \rho_g v_g^2) - \frac{f_i \rho_g v_s^2 P_g}{8 A_p} - \frac{f_g \rho_g v_g^2 P_i}{8 A_p} - H_g \rho_g g \sin \theta + \psi_g v_a - F_D$$

2.6 DEFINICIÓN DEL MODELO

2.6.1 Modelo de cinética de hidratos transitorios

La tasa de formación de hidratos se calcula usando la siguiente ecuación de cinética intrínseca (Turner et al., 2005),

Ecuación 2. 19: Tasa de formación de hidratos

$$\frac{dm_{gas}}{dt} = -k_1 e^{\left(\frac{k_2}{T_{sys}}\right)} A_s \Delta T$$

La ecuación de cinética intrínseca da la tasa de consumo de gas durante la formación de hidratos (dm_{gas}/dt) en función de las constantes de velocidad intrínsecas (k_1 y k_2) retrocediendo de los datos de Vysniauskas y Bishnoi (1983); el área superficial (A_s) entre las fases de agua y gas; y el subenfriamiento (ΔT_{sub}) como fuerza impulsora térmica.

El subenfriamiento se define como la diferencia entre la temperatura de equilibrio de los hidratos y la temperatura del sistema. Se supone que la nucleación de hidratos ocurre inmediatamente después de un subenfriamiento específico.

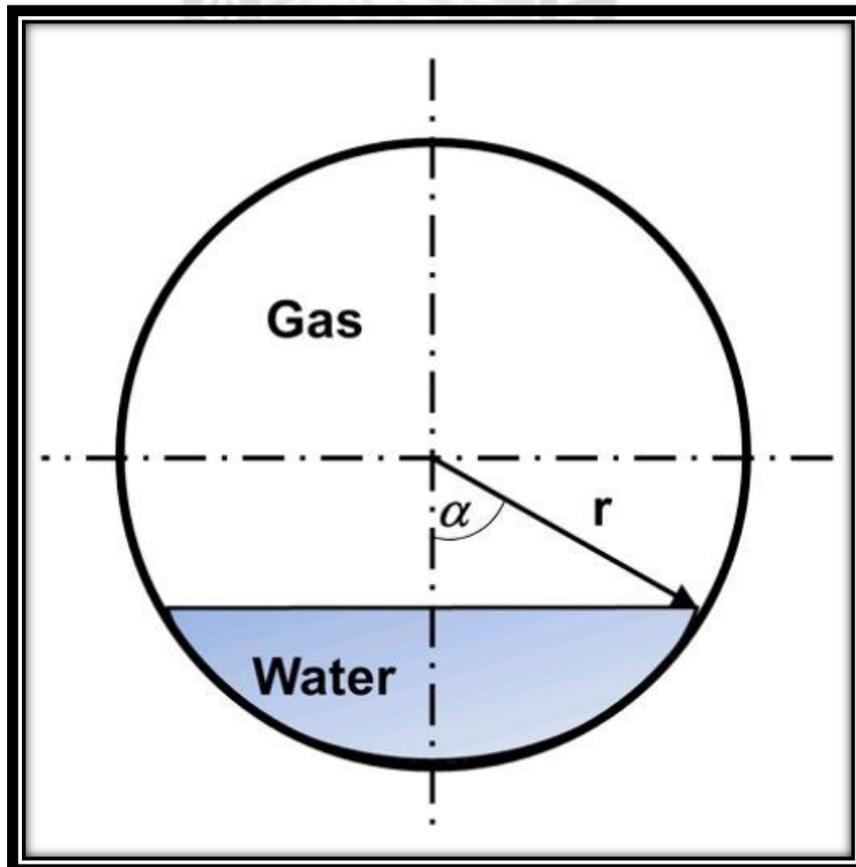
El área superficial entre el agua y el gas se calcula asumiendo un flujo uniforme estratificado en cada sección de la tubería (Figura 2.3).

El área de la sección transversal de la capa de agua (A_s) en función del radio de la tubería (r) y el ángulo húmedo (α) viene dada por,

Ecuación 2. 20: Área de la sección transversal de la capa de agua

$$A_w = \frac{r^2}{2} (2\alpha - \text{sen}2\alpha)$$

Figura 2. 3: Sección transversal de la tubería con flujo uniforme estratificado régimen



Fuente: Biberg, 1999

La relación entre la retención de agua (H_w) y el ángulo húmedo en el flujo estratificado se obtiene mediante la definición de retención de agua,

Ecuación 2. 21: Relación entre la retención de agua (H_w) y el ángulo húmedo

$$H_w = \frac{2\alpha - \text{sen}2\alpha}{2\pi}$$

Esta es una función no lineal del ángulo húmedo.

Dada la retención de líquido, esta ecuación se puede resolver para el ángulo mojado usando un método numérico.

Alternativamente, se puede usar una aproximación explícita para el ángulo mojado como función de retención de líquido para evitar cálculos iterativos (Biberg, 1999),

Ecuación 2. 22: función de retención de líquido

$$\alpha \approx \frac{\pi}{2} \left[1 - (1 - H_w)^{\frac{1}{3}} + H_w^{\frac{1}{3}} \right]$$

Entonces, la superficie el área entre el agua y el gas en una sección de tubería es:

Ecuación 2. 23: Superficie del área entre el agua y el gas

$$A_s = 2r \text{sen}(\alpha) \Delta x$$

2.6.2 Ecuación de conservación de energía de la mezcla

La ecuación de conservación de energía de la mezcla utilizada en este trabajo se basa en un modelo de fluido homogéneo, donde las fases gaseosa, líquida e hidratada se tratan como una pseudofase, y las propiedades son el volumen promedio de las fases independientes (Cazarez-Candia y Vasquez-Cruz, 2005).

La ecuación de balance de energía incluye términos para el comportamiento transitorio de la entalpía del sistema, la convección de energía, el cambio transitorio en la presión del sistema, la disipación viscosa del fluido, el cambio en la energía potencial, la transferencia de calor de la pared de la tubería al medio ambiente y un término fuente para la exotérmica. Naturaleza de la reacción de formación de hidratos.

La ecuación del balance de energía en términos de la entalpía de pseudofase es

Ecuación 2. 24: Balance de energía en términos de la entalpía de pseudofase

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} - v \frac{\partial v}{\partial t} - v^2 \frac{\partial v}{\partial x} - v g \sin \theta - \frac{q \pi d}{\rho A_p} + S_{E,hyd}$$

donde

h es la entalpía de la mezcla por unidad de masa

v es la velocidad promedio en volumen

ρ es la densidad promedio en volumen

p es la presión del sistema

g es la aceleración de la gravedad

θ es el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal,

q es el flujo de calor de la pared

d es el diámetro de la tubería

$S_{E,hyd}$ es el término fuente de energía y está relacionado con la naturaleza exotérmica de la reacción de formación de hidratos por

Ecuación 2. 25: Naturaleza exotérmica de la reacción de formación de hidratos

$$S_{E,hyd} = \frac{n_H + 1}{\rho_{hyd} A_p \Delta x} \frac{d_{mgas}}{dt} \Delta h_{hyd}$$

La ecuación de conservación de la energía de la mezcla presentada anteriormente se basa en un modelo de fluido homogéneo, donde las fases de gas, líquido e

hidrato se tratan como una pseudofase. La densidad media de la mezcla dentro del ducto se calcula como:

Ecuación 2. 26: densidad media de la mezcla dentro del ducto

$$\rho = \rho_g H_g + \rho_w H_w + \rho_{hyd} H_{hyd}$$

Y la velocidad promedio se calcula como,

Ecuación 2. 27: Velocidad promedio

$$v = \frac{\rho_g H_g v_g + \rho_w H_w v_w + \rho_{hyd} H_{hyd} v_{hyd}}{\rho} = \frac{\rho_g v_{Sg} + \rho_w v_{Sw} + \rho_{hyd} v_{Shyd}}{\rho}$$

Cuando se forman hidratos, el calor de formación (Δh_{hyd}) actúa como fuente de energía dentro de una sección de tubería.

El siguiente es un procedimiento para expresar la ecuación de conservación de energía de la mezcla explícitamente en términos de temperatura.

Desde la teoría termodinámica, la entropía (s) es función de la presión (p) y la temperatura (T).

Ecuación 2. 28: Entropía en función de la presión y la temperatura

$$d_{S_k} = \left(\frac{\partial S_k}{\partial T_k} \right)_{p_k} dT_k + \left(\frac{\partial S_k}{\partial p_k} \right)_{T_k} dp_k$$

La entalpía específica también es función de la temperatura y la presión

Ecuación 2. 29: Entalpía específica

$$d_{h_k} = C_{p,k} dT_k + \left(\frac{\partial h_k}{\partial p_k} \right)_{T_k} dp_k$$

Para sistemas compresibles simples de composición química fija sujetos a un proceso internamente reversible, la primera ley de la termodinámica se puede escribir como:

Ecuación 2. 30: Primera ley de la termodinámica

$$d_{S_k} = \frac{dh_k}{T_k} - \frac{v_k dp_k}{T_k}$$

donde:

v_k es el volumen específico

k denota un gas o un líquido.

Sustituyendo

Ecuación 2. 31: Primera ley de la termodinámica modificada

$$d_{S_k} = \frac{C_{p,k}}{T_k} dT_k + \frac{1}{T_k} \left[\left(\frac{\partial h_k}{\partial p_k} \right)_{T_k} - v_k \right] dp_k$$

A partir de las ecuaciones anteriores se puede obtener la siguiente ecuación,

Ecuación 2. 32: Relación termodinámica deducida

$$\left(\frac{\partial s_k}{\partial T_k} \right)_{p_k} = \frac{C_{p,k}}{T_k}$$

De Maxwell,

Ecuación 2. 33: Relación de Maxwell

$$\left(\frac{\partial v_k}{\partial T_k} \right)_{p_k} = - \left(\frac{\partial s_k}{\partial p_k} \right)_{T_k}$$

Sustituyendo la anterior ecuación

$$d_{S_k} = \frac{C_{p,k}}{T_k} dT_k - \left(\frac{\partial v_k}{\partial T_k} \right)_{p_k} dp_k$$

Luego se tiene:

$$\frac{C_{p,k}}{T_k} dT_k - \left(\frac{\partial v_k}{\partial T_k} \right)_{p_k} dp_k = \frac{dh_k}{T_k} - \frac{v_k dp_k}{T_k}$$

Despejando h_k

Ecuación 2. 34: Variación de la entalpía

$$dh_k = C_{p,k} dT_k + \left[v_k - T_k \left(\frac{\partial v_k}{\partial T_k} \right)_{p_k} \right] dp_k$$

Derivación de la Ecuación con respecto a la presión que da una constante entalpía,

Ecuación 2. 35: Ecuación con respecto a la presión que da una entalpía constante

$$\eta_k = \left(\frac{dT_k}{dp_k} \right)_{h_k} = \frac{1}{C_{p,k}} \left[T_k \left(\frac{\partial v_k}{\partial T_k} \right)_{p_k} - v_k \right]$$

donde

η es el coeficiente de Joule-Thomson.

Finalmente

Ecuación 2. 36: Variación de la entalpía en función del coeficiente de Joule-Thomson

$$dh_k = C_{p,k} dT_k - \eta_k C_{p,k} dp_k$$

Combinando las últimas ecuaciones se obtiene la ecuación de balance de energía en términos de temperatura,

Ecuación 2. 37: Ecuación de balance de energía en términos de temperatura

$$C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \beta \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + v \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) = -v g \sin \theta - \frac{q \pi d}{\rho A_p} + S_{E,hyd}$$

donde,

Ecuación 2. 38: Coeficiente β

$$\beta = \frac{\rho_g H_g \eta_g C_{p,g} + \rho_w H_w \eta_w C_{p,w}}{\rho}$$

Ecuación 2. 39: Calor específico

$$C_p = \frac{\rho_g H_g C_{p,g} + \rho_w H_w C_{p,w}}{\rho}$$

El coeficiente de Thomson para la fase gaseosa se puede estimar usando la siguiente correlación:

Ecuación 2. 40: Coeficiente de Thomson

$$\eta_g = \frac{0,0048823 \times T_{pc} \left(\frac{18}{T_{pr}^2} - 1 \right)}{p_{pc} C_{p,g} \gamma_g}$$

El coeficiente de Joule-Thomson para la fase de agua líquida se puede estimar a partir de:

Ecuación 2. 41: Coeficiente de Joule-Thomson para la fase de agua líquida

$$\eta_w = -\frac{1}{\rho_w C_{p,w}}$$

La ecuación del balance de energía en términos de temperatura puede ser -escrito como:

Ecuación 2. 42: Balance de energía en términos de temperatura simplificado

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\beta}{C_p} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{v}{C_p} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ & = -\frac{v g \sin \theta}{C_p} - \frac{q \pi d}{C_p \rho A_p} + \frac{S_{E,hyd}}{C_p} \end{aligned}$$

La ecuación de balance de energía en términos de temperatura se puede discretizar aplicando primero esquema de orden descendente para derivadas espaciales y un esquema ascendente de primer orden para derivadas de tiempo, considerando un esquema numérico totalmente implícito, de la siguiente manera:

Ecuación 2. 43: Balance de energía en términos de temperatura discreta

$$\begin{aligned} \frac{T_i^{(n+1)} - T_i^{(n)}}{\Delta t} + v \frac{T_i^{(n+1)} - T_{i-1}^{(n+1)}}{\Delta x} - \frac{\beta}{C_p} \left(\frac{p_i^{(n+1)} - p_i^{(n)}}{\Delta t} + v \frac{p_i^{(n+1)} - p_{i-1}^{(n+1)}}{\Delta x} \right) \\ - \frac{1}{\rho C_p} \frac{p_i^{(n+1)} - p_i^{(n)}}{\Delta t} + \frac{v}{C_p} \left(\frac{v_i^{(n+1)} - v_i^{(n+1)}}{\Delta t} + v \frac{v_i^{(n+1)} - v_{i-1}^{(n+1)}}{\Delta x} \right) \\ = - \frac{v g \sin \theta}{C_p} - \frac{q \pi d}{C_p \rho A_p} + \frac{S_{E,hyd}}{C_p} \end{aligned}$$

Reordenando:

Ecuación 2. 44: Balance de energía en términos de temperatura discreta B

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{v}{\Delta x} \right] T_i^{(n+1)} - \left[\frac{1}{\rho C_p \Delta t} + \frac{\beta}{C_p} \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{v}{\Delta x} \right) \right] p_i^{(n+1)} + \frac{v}{C_p} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{v}{\Delta x} \right] v_i^{(n+1)} \\ = \frac{T_i^{(n)}}{\Delta t} + \frac{v}{\Delta x} T_{i-1}^{(n+1)} - \left[\frac{1}{\rho C_p \Delta t} + \frac{\beta}{C_p \Delta t} \right] p_i^{(n)} - \frac{\beta v}{C_p \Delta x} p_{i-1}^{(n+1)} + \frac{v}{C_p \Delta t} v_i^{(n)} \\ + \frac{v v}{C_p \Delta x} v_{i-1}^{(n+1)} - \frac{v g \sin \theta}{C_p} - \frac{q \pi d}{C_p \rho A_p} + \frac{S_{E,hyd}}{C_p} \end{aligned}$$

Para este modelo, suponemos que se conocen los perfiles de presión y velocidad y que la única incógnita es $T^{(n+1)}$ i, que se resuelve de forma explícita y secuencial desde el nodo

Ecuación 2. 45: Balance de energía en términos de presión y velocidad

$$T_i^{(n+1)} = \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{v}{\Delta x} \right]^{-1} \left\{ \left[\frac{1}{\rho C_p \Delta t} + \frac{\beta}{C_p} \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{v}{\Delta x} \right) \right] p_i^{(n+1)} - \frac{v}{C_p} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{v}{\Delta x} \right] v_i^{(n+1)} + \frac{T_i^{(n)}}{\Delta t} \right. \\ \left. + \frac{v}{\Delta x} T_{i-1}^{(n+1)} - \left[\frac{1}{\rho C_p \Delta t} + \frac{\beta}{C_p \Delta t} \right] p_i^{(n)} - \frac{\beta v}{C_p \Delta x} p_{i-1}^{(n+1)} + \frac{v}{C_p \Delta t} v_i^{(n)} \right. \\ \left. + \frac{v v}{C_p \Delta x} v_{i-1}^{(n+1)} - \frac{v g \sin \theta}{C_p} - \frac{q \pi d}{C_p \rho A_p} + \frac{S_{E,hyd}}{C_p} \right\}$$

2.6.3 Modelo final propuesto

Se utiliza un modelo de transferencia de masa propuesto por Skovborg y Rasmussen (1994) para predecir la tasa de consumo de gas durante la formación de hidratos en sistemas dominados por agua,

Ecuación 2. 46: Tasa de consumo de gas durante la formación de hidratos en sistemas dominados por agua

$$\frac{dm_{gas}}{dt} = -k_{masa} A_s (C_{sol} - C_{sol-hyd})$$

El modelo de transferencia de masa utiliza como fuerza impulsora para la formación de hidratos, la diferencia entre la solubilidad del gas en agua (C_{sol}) y la concentración de gas en agua en equilibrio con hidratos ($C_{sol-hyd}$).

El modelo de transferencia de masa se basa en dos cantidades clave: el área superficial del agua y el gas (A_s) y el coeficiente de transferencia de masa (k_{masa}). La superficie gas-agua se determina mediante correlaciones empíricas que dependen del régimen de flujo multifásico (flujo estratificado y slug flow).

Para flujo estratificado, el área superficial gas-agua se calcula asumiendo una interfase suave estratificada, de acuerdo con la ilustración que se muestra en la Figura 5.20.

Entonces, el área superficial de agua por unidad de volumen para flujo estratificado es

Ecuación 2. 47: Área superficial de agua por unidad de volumen para flujo estratificado

$$A_s = \left[\pi - \frac{2\alpha - \text{sen}2\alpha}{2} \right] r^2$$

Para calcular la masa total de líquido para relacionar las funciones anteriores de transferencia de masa de hidrato, se utiliza entonces:

Ecuación 2. 48: Densidad de hidrato

$$\rho_{hyd} = \frac{m}{V} = \frac{m}{A_s L}$$

Ecuación 2. 49: Masa de hidrato

$$m = \rho_{hyd} \left[\pi - \frac{2\alpha - \text{sen}2\alpha}{2} \right] r^2 L$$

CAPÍTULO III: MARCO REFERENCIAL

3.1 CARACTERÍSTICAS DEL GASODUCTO

El gasoducto al altiplano es uno de los ramales principales de nuestro país, ya que transporta gas natural al occidente del país, abasteciendo a su población. Este gasoducto fue construido en su primera fase en 1984-1988 solo abarca el ramal principal. Tiene una longitud total de 779.28 km.

Después de unos años se evidencio que se tenía un incremento en la demanda de dicho compuesto, por lo tanto se observe que la capacidad que se mandaba no era suficiente, entonces se empezó a construir tuberías paralelas que al mismo modo de incrementar la capacidad también mejora las caídas de presión de los tramos donde era instalada.

Hoy en día el actual Gasoducto se encuentra lupeado (existencia de varias tuberías paralelas) y hasta la fecha para adelante son pocas las zonas donde no existen este tipo de tuberías.

3.1.1 Parámetros actuales

Se podrá observar las diferentes características de operación que tiene el gasoducto al altiplano, también se puede notar en el Anexo C un poco más de las características de los compresores.

3.1.1.1 Caudal de operación

El GAA opera en forma continúa, el caudal promedio de 65 MMpcd. Este caudal está en función a la cantidad de Gas consumido por los usuarios de Cochabamba, Oruro y La Paz.

3.1.2 Parámetros operativos

El conocimiento de Parámetros, como Presión, Temperatura y Gravedad específica se ven a continuación:

- MAOP 1,440 Psig.
- MOP 1,420 Psig.
- Temperatura Máxima. 120°F.
- Gravedad Específica 0.597.

3.1.2.1 Recepción de gas en planta de Río Grande

El Gas Natural que se transporta en el gasoducto al altiplano GAA es recibido de la planta de Repsol YPFB en Río Grande.

El caudal esta en función a los consumos en el área Cochabamba – Oruro – La Paz. La presión de entrega promedio es de 1,420 Psig y un volumen promedio de 65 MMpcd

3.1.2.2 Estación de compresión Samaipata

La operación de esta planta es descrita a continuación:

- Capacidad de transporte 75 MMpcd
- Presión de llegada 670 Psig
- RPM 850 a 1,150
- Presión de descarga 1,420 Psig

3.1.2.3 Estación de compresión Oconi

Se describe los parámetros de operación de la estación a continuación:

- Capacidad de transporte 75 MMpcd
- Presión de llegada 670 Psig
- RPM 850 a 1,150
- Presión de descarga 1,420 Psig

3.1.2.4 Estación de compresión Chilijchi

La operación de la estación se describe a continuación:

- Capacidad de transporte 75 MMpcd.
- Presión de llegada 670 Psig
- Presión de descarga 1,420 Psig

3.1.2.5 Terminal Cochabamba

En este punto se entrega a:

- YPFB Refinación con una presión de salida de 100 Psig
- Encogas Sacaba con una presión de salida 470 Psig
- Encogas Sumumpaya con una presión de salida de 650 Psig

3.1.2.6 Estación de compresión Parotani

En este punto se entrega a:

- Compresión hacia Oruro con una capacidad de transporte de 51.6 MMpcd y una presión de salida de 1,420 Psig.
- Entrega a usuarios Cochabamba (Parotani, YPFB Redes de Gas) con una presión de salida de 480 Psig.
- Entrega a Coboce y Calco con una presión de salida de 700 Psig.

3.1.2.7 Estación de compresión Oruro

Procede de Parotani con una presión de llega de 900 Psi. La compresión hacia Senkata (solo en emergencia) se la realiza con una presión de descarga de 1,100 Psig, también entrega a YPFB-GNRD (Oruro) con una presión de salida de 370 Psig.

3.1.2.8 Estación de compresión Sica Sica

Procede de Parotani con una presión de llega de 650 Psig y una capacidad de transporte de 51.6 MMpcd. La compresión hacia Senkata se la realiza con una presión de descarga de 1,420 Psig.

3.1.2.9 Terminal Senkata

Con una máxima presión de llegada de 700 psig entrega a:

- Entrega a usuarios La Paz con presión de salida de 355 Psig
- Entrega a Coboce con presión de salida de 500 Psi

3.1.3 Resumen de características por tramo:

Se presentan las siguientes características por tramo:

Tabla 3. 1: Características gasoducto al Altiplano GAA

GASODUCTO AL ALTIPLANO GAA				
N°	TRAMOS	VOLUMEN [MMPCD]	DIÁMETRO [plg]	Longitud [Km]
1	Río Grande – Samaipata	47,5	10 3/4	118,934
2	Samaipata – Oconi	47,5	10 3/4	114,080
3	Oconi – Buena Vista	47,5	10 3/4	61,772

4	Buena Vista – Huayñacota	47,5	10 3/4	136,202
5	Huayñacota – Parotani	47,5	10 3/4	23,222
7	Oruro – Sica Sica	17	6 5/8	105,805
8	Sica Sica - Senkata	17	6 5/8	92,572
LONGITUD TOTAL GASODUCTO AL ALTIPLANO				779,285

Fuente: Transredes S.A., 2022

El modelo se aplicará en tres tramos diferentes, que se describen a continuación, para verificar la variación y validación del mismo respecto a la formación de hidratos. Se toman en cuenta los loop donde se realiza también el control de calidad del gas.

3.1.4 Tramo Sica Sica – Senkata

Para el tercer tramo en estudio se tienen las siguientes características:

Tabla 3. 2: Tercer tramo en estudio

TRAMO SICA SICA – SENKATA		
VARIABLE	VALOR	UNIDAD
Longitud tramo	92,572	[Km]
Longitud Loop	26,320	[Km]
Diámetro del tramo	10 3/4	[plg]
Diámetro del loop	10	[plg]
Caudal	17	[MMPCD]

Fuente: Transredes S.A., 2022

3.1.5 Variables operativas de los loops

Se tienen las mismas características de funcionamiento de los loop:

Tabla 3. 3: Características de funcionamiento de los loop

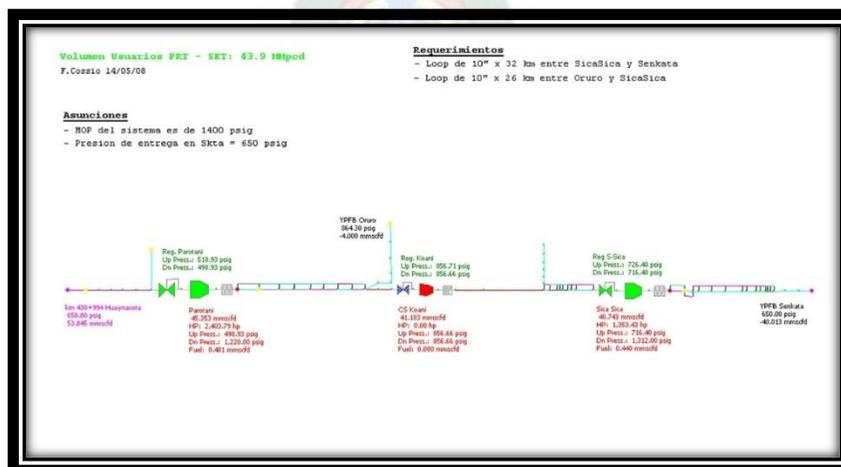
Datos de operación de la Tubería para 10"				
Diámetro del Tubo (Dia.)	10.75	10.75	10.75	Pulgadas
Espesor de Pared (t)	0.250	0.279	0.307	Pulgadas
Tensión de Fluencia Mínima Especificada - SMYS	52000	52000	52000	psi
Presión de Operación (MOP)	1440	1440	1440	psi
Factor de Diseño (DF)	0.72	0.60	0.50	
Factor de Temperatura (TF)	1	1	1	
Factor de junta (JF)	1	1	1	
Presión de Diseño (MAOP or P)	1741	1619	1485	psi
Datos de operación de la Tubería para 12"				
Diámetro del Tubo (Dia.)	12.75	12.75	10.75	Pulgadas
Espesor de Pared (t)	0.281	0.312	0.375	Pulgadas
Tensión de Fluencia Mínima Especificada - SMYS	52000	52000	52000	psi
Presión de Operación (MOP)	1440	1440	1440	psi
Factor de Diseño (DF)	0.72	0.60	0.50	
Factor de Temperatura (TF)	1	1	1	
Factor de junta (JF)	1	1	1	
Presión de Diseño (MAOP or P)	1650	1527	1529	psi

Fuente: Transredes S.A., 2022

Los loops que se instalaron como parte del proyecto GAA III B suman 72 km en total, 58 km con cañería de 10", Grado API 5LX52, de diferentes espesores: 0,250", 0,279" y 0,307"; y 14 km con cañería de 12", Grado API 5LX52, de diferentes espesores: 0,281", 0,312" y 0,375" según la clasificación de áreas.

Para mejor entendimiento se muestra la gráfica de un loop del gasoducto GAA:

Tabla 3. 4: Gráfica de un loop del gasoducto GAA



Fuente: Transredes S.A., 2022

3.2 MÉTODOS PARA EVITAR EL RIESGO DE FORMACIÓN DE HIDRATOS EN LOS LOOPS

Los siguientes métodos son usados para ubicar al punto de operación en la región sin riesgo de formación de hidratos. Los métodos afectan la composición del fluido o directamente al punto de operación; algunos combinan ambas opciones.

3.2.1 Métodos para ubicar al Punto de Operación en una Región sin Riesgo de Hidratos:

A) El fluido es mantenido a una temperatura mayor que la de formación de hidratos:

- Aislamiento o uso de chaquetas (con vapor, agua caliente, etc.) en las líneas para minimizar las pérdidas de calor.
- Traceado (acompañamiento) eléctrico o con vapor, esta opción puede ser usada en las líneas y en las válvulas manuales, de control, alivio, despresurización, etc.
- Inyección de aceite caliente en el fluido para aumentar su temperatura, este método es poco empleado.

B) El agua es removida del fluido: • Deshidratación. Por ejemplo con glicol, tamices moleculares, membranas. • Desplazamiento del agua con un fluido que no forma hidratos.

C) La presión de operación es ubicada por debajo de la requerida para la formación de hidratos:

- Disminuyendo la presión de operación de la línea.
- Despresurización para desestabilizar los hidratos y eliminar taponamientos.

3.2.2 Inhibidores termodinámicos

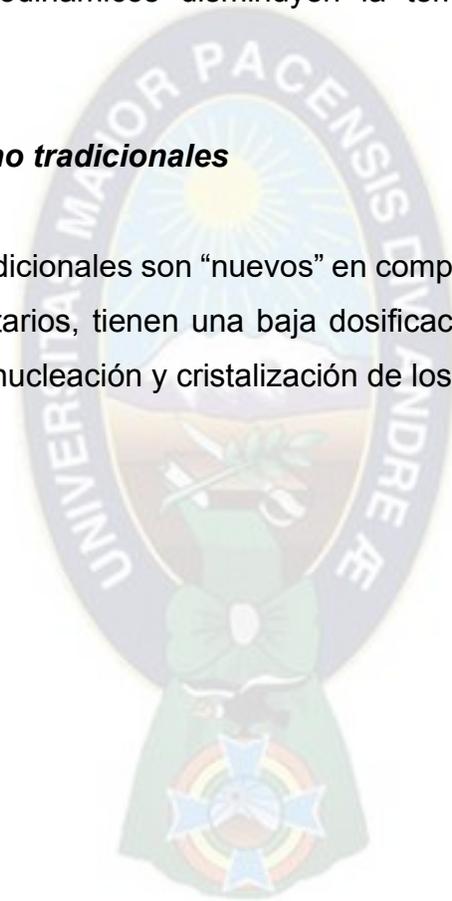
Los inhibidores de formación de hidratos son usados para desplazar la curva de formación, cambiar la estructura de los hidratos o retrasar su formación

3.2.2.1 *Inhibidores Termodinámicos (Tradicionales) de Hidratos*

Los inhibidores termodinámicos disminuyen la temperatura de estabilidad de formación

3.2.2.2 *Inhibidores no tradicionales*

Los inhibidores no tradicionales son “nuevos” en comparación con los tradicionales, son productos propietarios, tienen una baja dosificación (LDHI, por sus siglas en inglés) y controlan la nucleación y cristalización de los hidratos.



CAPITULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA

4.1 ANÁLISIS DE TRANSICIÓN DE RÉGIMEN DE FLUJO EN EL GASODUCTO GAA

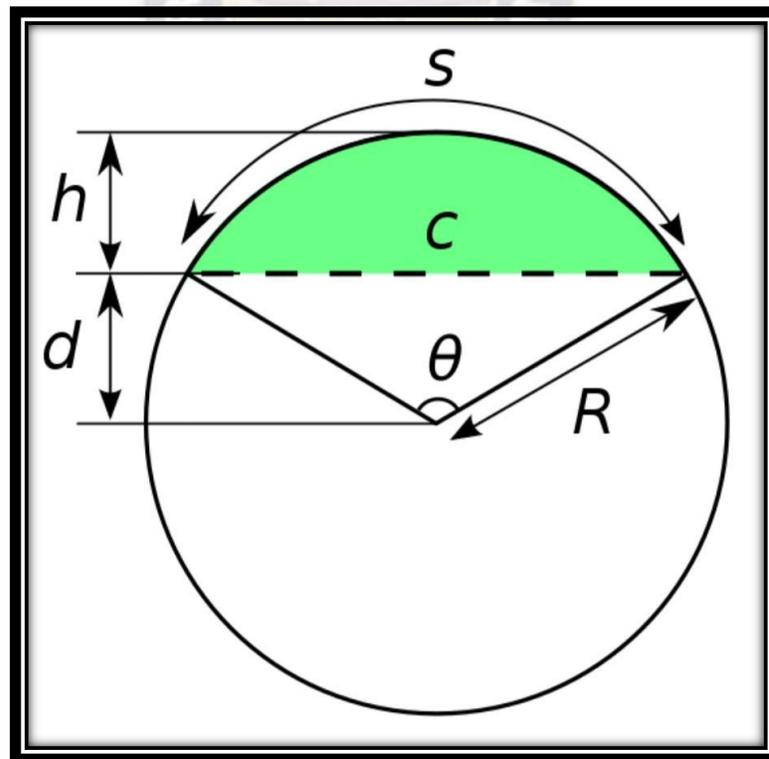
4.1.1 Incremento del espesor interno

Se tiene:

$$A_s = \frac{D^2}{8} \left\{ 2 \text{ArcCos} \left[1 - \frac{2h_L}{D} \right] - \text{Sen} \left[2 \text{ArcCos} \left[1 - \frac{2h_L}{D} \right] \right] \right\}$$

Para entender gráficamente se representa la sección de formación de hidratos en la siguiente gráfica adoptado de una explicación general:

Figura 4. 1: Sección de formación de hidratos



Fuente: Weisstein, Eric W. «Segmento circular». En Weisstein, Eric W, ed. MathWorld (en inglés).
Wolfram Research, 2015

El volumen de espesor de hidrato en un ducto se define como:

$$V_H = A_s \times L_{ducto}$$

Lo que reemplazando queda como:

$$V_H = \frac{D^2}{8} \left\{ 2\text{ArcCos} \left[1 - \frac{2h_L}{D} \right] - \text{Sen} \left[2\text{ArcCos} \left[1 - \frac{2h_L}{D} \right] \right] \right\} \times L_{ducto}$$

Pero para la masa de hidrato se tiene:

$$m_H = \rho_{hyd} \frac{D^2}{8} \left\{ 2\text{ArcCos} \left[1 - \frac{2h_L}{D} \right] - \text{Sen} \left[2\text{ArcCos} \left[1 - \frac{2h_L}{D} \right] \right] \right\} \times L_{ducto}$$

Por otra parte, se desea determinar el incremento del espesor para diferentes días, por tanto; se utiliza la teoría de la derivada que se adapta al incremento o tasa de crecimiento, donde la longitud y diámetro del ducto se mantiene constante ya que esta no influye en el crecimiento:

$$\frac{d(m_H)}{dt} = \rho_{hyd} \frac{d}{dt} \left(\frac{D^2}{8} \left\{ 2\text{ArcCos} \left[1 - \frac{2h_L}{D} \right] - \text{Sen} \left[2\text{ArcCos} \left[1 - \frac{2h_L}{D} \right] \right] \right\} \right) \times L_{ducto}$$

$$\Delta m_H = \rho_{hyd} \times \frac{D^2}{8} \left[\frac{4}{\sqrt{D^2 - 4h_L^2}} - \frac{4}{\sqrt{D^2 - 4h_L^2}} \text{Cos} \left[2\text{ArcCos} \left[1 - \frac{2h_L}{D} \right] \right] \right] \times \Delta h_L \times L_{ducto}$$

$$\Delta m_H = \rho_{hyd} \times \frac{D^2}{2\sqrt{D^2 - 4h_L^2}} \times \left(1 - \text{Cos} \left[2\text{ArcCos} \left(1 - \frac{2h_L}{D} \right) \right] \right) \times L_{ducto} \times \Delta h_L$$

Pero se necesita calcular el incremento del espesor interno del gasoducto tomando como referencia el incremento de la masa que se obtiene pesando los escombros que se extraen cada mes en la limpieza realizada por el pigging:

$$\Delta h_L = \frac{2\sqrt{D^2 - 4h_L^2}}{\rho_{hyd} D^2 \times L_{ducto}} \left(1 - \cos \left[2 \text{ArcCos} \left(1 - \frac{2h_L}{D}\right)\right]\right)^{-1} \times \Delta m_H$$

O en su entendimiento:

$$\Delta h_L = \frac{\frac{2\sqrt{D^2 - 4h_L^2}}{\rho_{hyd} D^2 \times L_{ducto}} \times \Delta m_H}{\left(1 - \cos \left[2 \text{ArcCos} \left(1 - \frac{2h_L}{D}\right)\right]\right)}$$

4.1.2 Masa extraída de hidratos por limpieza se obtienen las siguientes tablas:

Se tienen los siguientes datos de cantidad en kilogramos de la masa obtenida al mes:

Tabla 4. 1: Cantidad en kilogramos de la masa obtenida al mes, Tramo 1 - 4

Tiempo de operación	Masa extraída Tramo 1	Masa extraída Tramo 2	Masa extraída Tramo 3	Masa extraída Tramo 4
02/02/2021	0,01	0,01	0,012	0,015
04/03/2021	0,5	0,54	0,56	0,4968
03/04/2021	2,34	1,26	2,3868	1,4112
03/05/2021	3,24	1,78	3,3048	1,9936
02/06/2021	3,45	2,21	3,519	2,4752
02/07/2021	3,78	2,74	3,8556	3,0688
01/08/2021	0,02	0,03	0,0224	0,0336
31/08/2021	0,6	0,23	0,672	0,2576
30/09/2021	0,79	0,48	0,8848	0,5376

30/10/2021	1,25	0,79	1,4	0,8848
29/11/2021	2,47	1,28	2,7664	1,4336
29/12/2021	2,58	1,47	2,3736	1,6464
28/01/2022	2,94	1,84	3,2928	2,0608
27/02/2022	3,25	2,04	3,64	2,2848
29/03/2022	3,78	2,41	4,2336	2,6992
28/04/2022	0,05	0,01	0,056	0,0112
28/05/2022	0,36	0,54	0,4032	0,6048
27/06/2022	0,58	0,69	0,6496	0,7728
27/07/2022	0,89	1,32	0,9968	1,4784
26/08/2022	1,28	2,12	1,3056	2,3744
25/09/2022	2,46	2,36	2,5092	2,6432
25/10/2022	2,78	3,1	2,8356	3,038
24/11/2022	3,65	3,21	3,723	3,1458
24/12/2022	4,23	3,5	4,1454	3,57

Fuente: YPFB Transporte, 2023

Tabla 4. 2: Cantidad en kilogramos de la masa obtenida al mes, Tramo 5 - 8

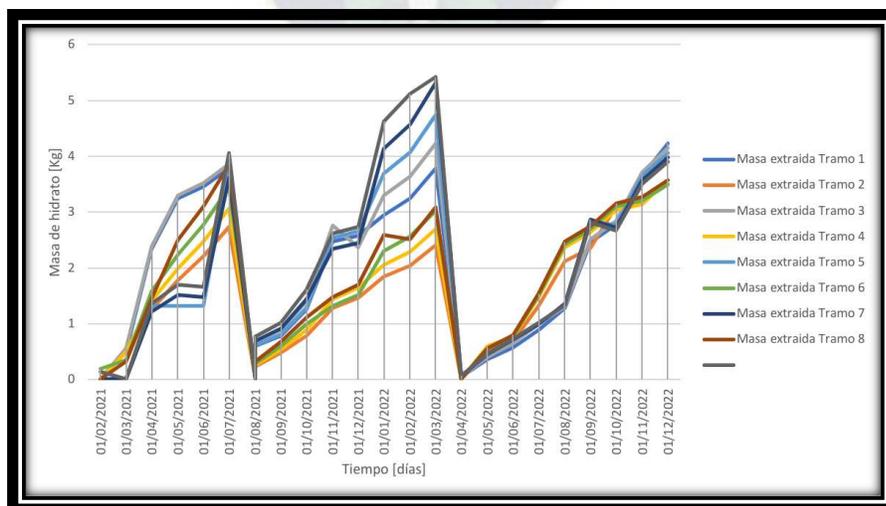
Tiempo de operación	Masa extraída Tramo 5	Masa extraída Tramo 6	Masa extraída Tramo 7	Masa extraída Tramo 8
02/02/2021	0,01	0,2	0,01	0,01
04/03/2021	0,016	0,35	0,01472	0,322
03/04/2021	1,32	1,580544	1,2144	1,45410048
03/05/2021	1,32	2,232832	1,524096	2,50077184
02/06/2021	1,32	2,772224	1,4784	3,10489088
02/07/2021	3,932712	3,437056	3,61809504	3,84950272
01/08/2021	0,022848	0,037632	0,02102016	0,04214784
31/08/2021	0,61824	0,288512	0,6924288	0,32313344
30/09/2021	0,814016	0,602112	0,91169792	0,67436544
30/10/2021	1,288	0,990976	1,44256	1,10989312
29/11/2021	2,545088	1,318912	2,34148096	1,47718144
29/12/2021	2,658432	1,514688	2,44575744	1,69645056

28/01/2022	3,687936	2,308096	4,13048832	2,58506752
27/02/2022	4,0768	2,558976	4,566016	2,50779648
29/03/2022	4,741632	3,023104	5,31062784	3,08356608
28/04/2022	0,06272	0,010304	0,0639744	0,01051008
28/05/2022	0,451584	0,556416	0,46061568	0,56754432
27/06/2022	0,727552	0,788256	0,71300096	0,80402112
27/07/2022	1,016736	1,507968	0,99640128	1,53812736
26/08/2022	1,331712	2,421888	1,35834624	2,47032576
25/09/2022	2,810304	2,696064	2,86651008	2,74998528
25/10/2022	2,778888	3,09876	2,72331024	3,1607352
24/11/2022	3,64854	3,208716	3,5755692	3,27289032
24/12/2022	4,062492	3,4986	3,98124216	3,568572

Fuente: YPFB Transporte, 2023

Se puede observar entonces que se tiene una gran cantidad de las masas que se extrae durante la limpieza de los hidratos en cada tramo de control en los gasoductos por tanto decidimos graficar para poder obtener las pendientes del incremento de la masa en el tiempo:

Figura 4. 2: Cantidad de hidratos extraída en casa tramo del gasoducto GAA



Fuente: YPFB Transporte, 2023

Aplicando la ecuación de la recta que pasa por dos puntos procedemos a obtener la pendiente de cada curva en la creciente intermedia.

$$\frac{y - y_2}{x - x_2} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Para el tramo 1,

$$\frac{y - 0,6}{x - 260} = \frac{0,6 - 3,78}{260 - 420}$$

$$\Delta m_H = 0,019 \frac{\text{Kgr}}{\text{día}}$$

Para el tramo 2,

$$\frac{y - 0,6}{x - 260} = \frac{0,6 - 2,41}{260 - 420}$$

$$\Delta m_H = 0,011 \frac{\text{Kgr}}{\text{día}}$$

Para el tramo 3,

$$\frac{y - 0,6}{x - 260} = \frac{0,6 - 4,23}{260 - 420}$$

$$\Delta m_H = 0,023 \frac{\text{Kgr}}{\text{día}}$$

Para el tramo 4,

$$\frac{y - 0,6}{x - 260} = \frac{0,6 - 2,69}{260 - 420}$$

$$\Delta m_H = 0,013 \frac{\text{Kgr}}{\text{día}}$$

Para el tramo 5,

$$\frac{y - 0,61}{x - 260} = \frac{0,61 - 4,74}{260 - 420}$$

$$\Delta m_H = 0,026 \frac{Kgr}{día}$$

Para el tramo 6,

$$\frac{y - 0,28}{x - 260} = \frac{0,28 - 3,02}{260 - 420}$$

$$\Delta m_H = 0,017 \frac{Kgr}{día}$$

Para el tramo 7,

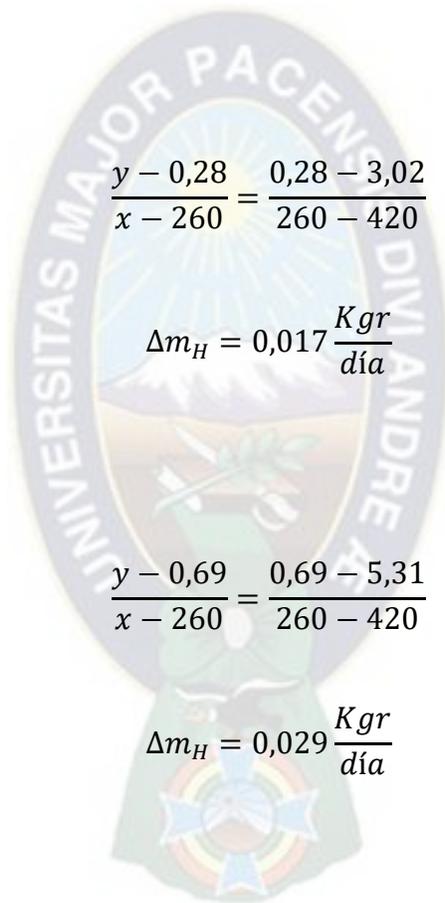
$$\frac{y - 0,69}{x - 260} = \frac{0,69 - 5,31}{260 - 420}$$

$$\Delta m_H = 0,029 \frac{Kgr}{día}$$

Para el tramo 8,

$$\frac{y - 0,32}{x - 260} = \frac{0,32 - 3,08}{260 - 420}$$

$$\Delta m_H = 0,017 \frac{Kgr}{día}$$



4.1.3 Espesor del depósito de hidratos a lo largo de la tubería para diferentes niveles de saturación de agua.

Para el tramo 1, D=10,3/4"

$$\Delta h_L = \frac{2\sqrt{D^2 - 4h_L^2}}{\rho_{hyd} D^2 \times L_{ducto}} \left(1 - \cos \left[2 \operatorname{ArcCos} \left(1 - \frac{2h_L}{D} \right) \right] \right)^{-1} \times \Delta m_H(1)$$

$$\Delta h_L = \frac{2\sqrt{(10,75 * 0,0254)^2 - 4(0,05)^2}}{800 \times (10,75 * 0,0254)^2 \times L_{ducto}} \left(1 - \cos \left[2 \operatorname{ArcCos} \left(1 - \frac{2 \times 0,05}{10,75 \times 0,0254} \right) \right] \right)^{-1} \times 0,019$$

$$\Delta h_L = 0,00745 \frac{m}{día} \approx 22,35 \frac{cm}{mes}$$

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se aplica entonces la simulación del incremento del hidrato para 12 meses y para los ocho tramos:

En un plan de mantenimiento de 20 días estos son los incrementos para cada tramo

Tabla 4. 3: Incrementos para cada tramo

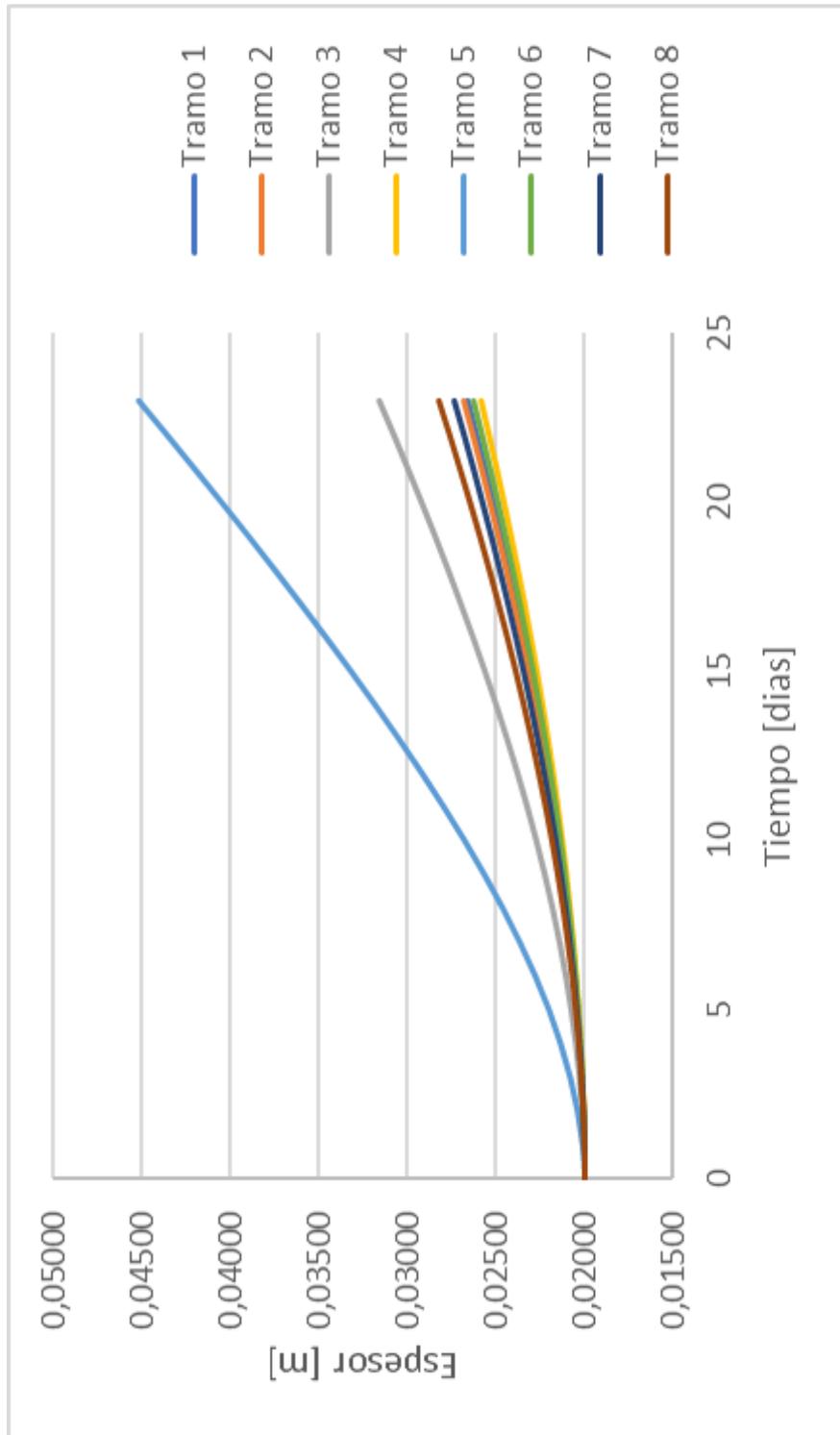
t [días]	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7	Tramo 8
0	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000
1	0,02003	0,02003	0,02005	0,02002	0,02014	0,02003	0,02003	0,02004
2	0,02008	0,02009	0,02016	0,02007	0,02042	0,02008	0,02009	0,02011
3	0,02016	0,02017	0,02032	0,02014	0,02083	0,02016	0,02018	0,02021
4	0,02027	0,02029	0,02052	0,02024	0,02138	0,02026	0,02031	0,02035
5	0,02041	0,02043	0,02078	0,02036	0,02204	0,02039	0,02046	0,02052
6	0,02057	0,02060	0,02109	0,02050	0,02281	0,02054	0,02064	0,02073
7	0,02076	0,02079	0,02144	0,02066	0,02368	0,02072	0,02085	0,02097
8	0,02097	0,02101	0,02184	0,02085	0,02464	0,02092	0,02109	0,02124
9	0,02121	0,02126	0,02228	0,02106	0,02568	0,02114	0,02135	0,02154

10	0,02147	0,02153	0,02275	0,02129	0,02680	0,02139	0,02164	0,02187
11	0,02175	0,02182	0,02327	0,02153	0,02797	0,02166	0,02196	0,02223
12	0,02206	0,02214	0,02382	0,02180	0,02921	0,02195	0,02230	0,02261
13	0,02238	0,02248	0,02440	0,02209	0,03049	0,02226	0,02266	0,02302
14	0,02273	0,02284	0,02502	0,02240	0,03182	0,02259	0,02305	0,02345
15	0,02309	0,02322	0,02566	0,02272	0,03319	0,02294	0,02345	0,02391
16	0,02348	0,02361	0,02633	0,02306	0,03459	0,02330	0,02388	0,02439
17	0,02388	0,02403	0,02703	0,02342	0,03603	0,02368	0,02432	0,02489
18	0,02430	0,02447	0,02775	0,02379	0,03749	0,02408	0,02478	0,02540
19	0,02473	0,02492	0,02849	0,02418	0,03898	0,02450	0,02526	0,02594
20	0,02518	0,02538	0,02925	0,02458	0,04049	0,02493	0,02576	0,02649
21	0,02565	0,02586	0,03003	0,02500	0,04203	0,02537	0,02627	0,02706
22	0,02613	0,02636	0,03082	0,02542	0,04358	0,02583	0,02680	0,02765
23	0,02662	0,02687	0,03163	0,02586	0,04515	0,02630	0,02734	0,02825
24	0,02712	0,02739	0,03246	0,02632	0,04674	0,02678	0,02789	0,02886
25	0,02764	0,02792	0,03330	0,02678	0,04834	0,02728	0,02846	0,02949
26	0,02817	0,02847	0,03416	0,02726	0,04995	0,02778	0,02904	0,03013
27	0,02871	0,02902	0,03503	0,02774	0,05157	0,02830	0,02962	0,03078
28	0,02926	0,02959	0,03590	0,02824	0,05321	0,02883	0,03022	0,03144
29	0,02981	0,03017	0,03679	0,02874	0,05485	0,02936	0,03083	0,03211
30	0,03038	0,03075	0,03769	0,02925	0,05650	0,02991	0,03145	0,03279
31	0,03096	0,03135	0,03860	0,02977	0,05817	0,03046	0,03208	0,03348
32	0,03154	0,03195	0,03952	0,03030	0,05983	0,03102	0,03271	0,03418
33	0,03214	0,03256	0,04045	0,03084	0,06151	0,03159	0,03336	0,03488
34	0,03274	0,03318	0,04138	0,03138	0,06319	0,03217	0,03401	0,03560
35	0,03334	0,03380	0,04232	0,03194	0,06487	0,03275	0,03467	0,03632
36	0,03396	0,03444	0,04327	0,03249	0,06656	0,03334	0,03534	0,03705
37	0,03458	0,03507	0,04423	0,03306	0,06825	0,03394	0,03601	0,03779
38	0,03520	0,03572	0,04519	0,03363	0,06995	0,03454	0,03669	0,03853
39	0,03584	0,03637	0,04616	0,03421	0,07165	0,03515	0,03737	0,03928
40	0,03648	0,03703	0,04713	0,03479	0,07335	0,03577	0,03806	0,04003
41	0,03712	0,03769	0,04811	0,03537	0,07505	0,03639	0,03876	0,04079
42	0,03777	0,03836	0,04909	0,03597	0,07675	0,03701	0,03946	0,04155
43	0,03842	0,03903	0,05008	0,03656	0,07845	0,03764	0,04016	0,04232

Fuente: Elaboración propia, 2023

Graficando se tiene:

Figura 4. 3: Crecimiento del hidrato dentro de cada ducto



Fuente: Elaboración propia, 2023

4.3 OBTENCIÓN DE DEFORMACIÓN DE ALTURAS DE HIDRATOS CON LA ECUACIÓN PARAMÉTRICA EN EL DUCTO

Los resultados utilizados en la ecuación diferencial de tasa de formación de hidratos

$$\frac{dm_{gas}}{dt} = -k_1 e^{\left(\frac{k_2}{T_{sys}}\right)} A_s \Delta T$$

Para la densidad en función de la masa y el volumen:

$$m_{gas} = \rho_{gas} (A_{sección} \times L_{tramo})$$

Reemplazando:

$$\frac{dA_{sección}}{dt} = - \frac{\left[k_1 e^{\left(\frac{k_2}{T_{sys}}\right)} A_s \Delta T \right]}{\rho_{gas} \times L}$$

Se reemplaza datos, para el mes inicial de octubre de 2021: hasta junio de 2022:

Tabla 4. 4: Deformación de alturas de hidratos, mes inicial de octubre de 2021

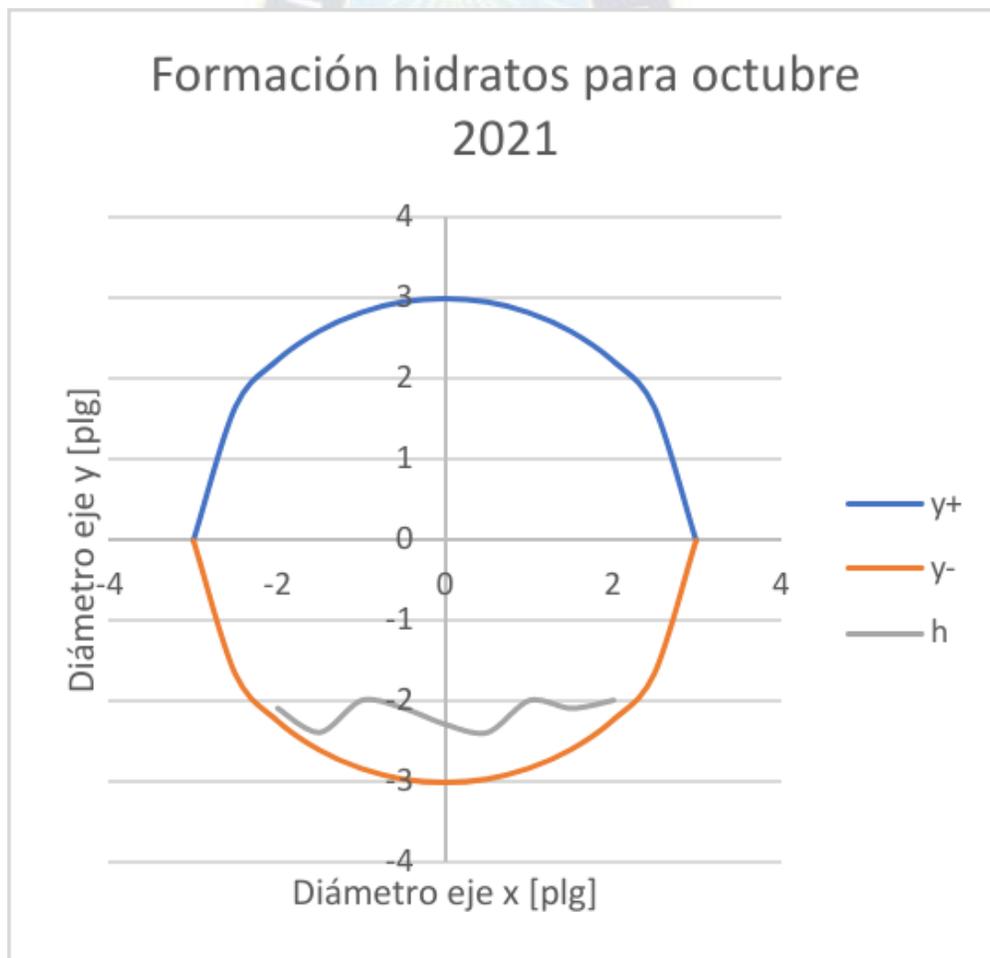
X	y+	y-	H hasta octubre 2021	H hasta junio 2022
-3	0	0		
-2,5	1,658312395	-1,658312395		-1,5
-2	2,236067977	-2,236067977	-2,1	-0,8
-1,5	2,598076211	-2,598076211	-2,4	-1
-1	2,828427125	-2,828427125	-2	-1,5
-0,5	2,958039892	-2,958039892	-2,1	0,2
0	3	-3	-2,3	-0,7

0,5	2,958039892	-2,958039892	-2,4	0,4
1	2,828427125	-2,828427125	-2	-
1,5	2,598076211	-2,598076211	-2,1	0,44
2	2,236067977	-2,236067977	-2	0,3
2,5	1,658312395	-1,658312395		-1
3	0	0		0

Fuente: Elaboración propia, 2023

Graficando cada análisis diferencial se obtiene la siguiente tasa de crecimiento de hidrato:

Figura 4. 4: Tasa de crecimiento de hidrato dede 2021

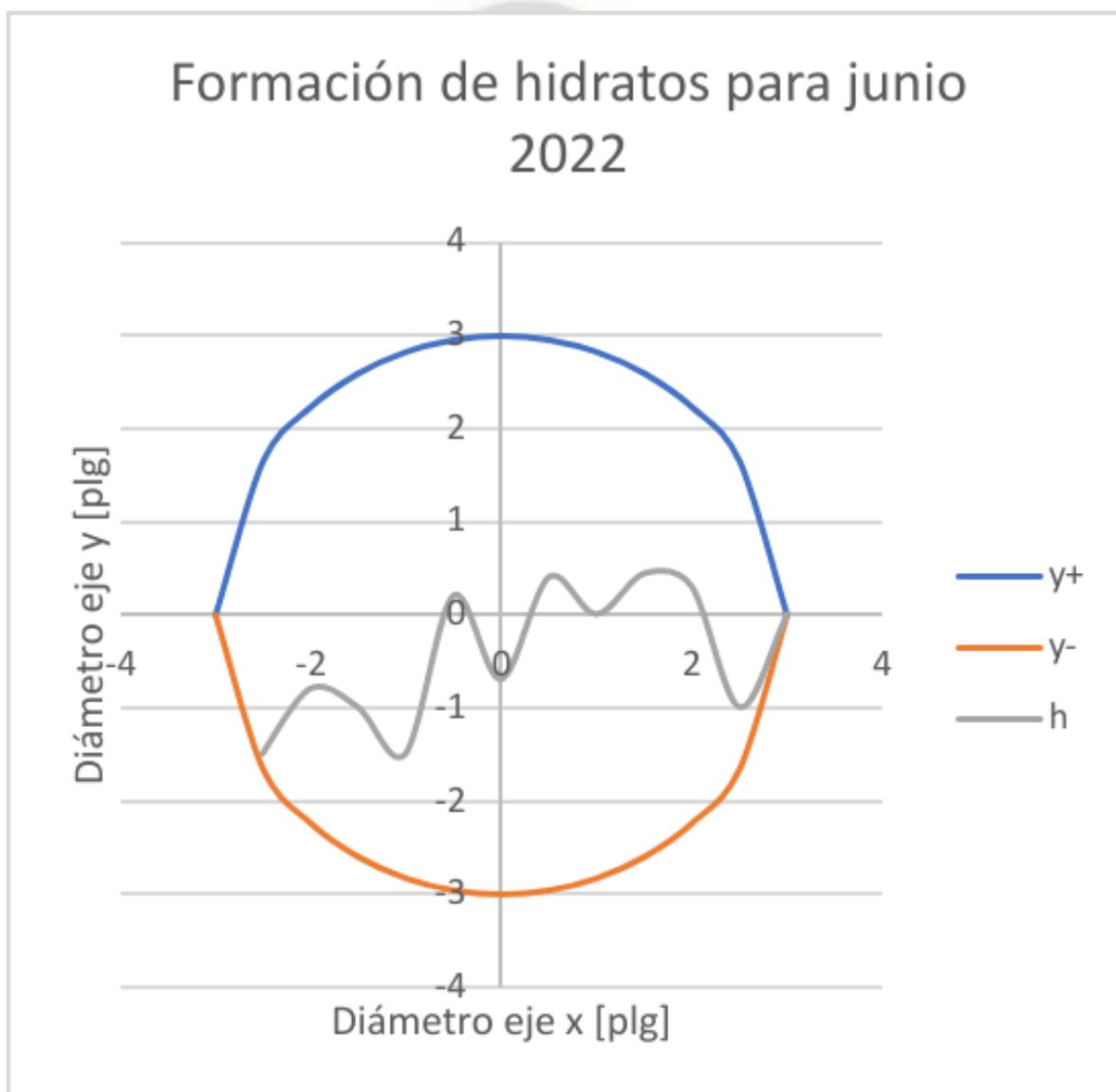


Fuente: Elaboración propia, 2023

En la anterior figura se puede observar que en los periodos iniciales el crecimiento del hidrato es menor y la tasa de variación comprende entre una altura de 1.8 a máximo 2 pulgadas debido al clima y las condiciones iniciales.

Para el crecimiento sin tratamiento hasta el mes de junio de 2022 se tiene los siguientes resultados:

Figura 4. 5: Tasa de crecimiento de hidrato hasta 2022



Fuente: Elaboración propia, 2023

En la anterior figura se puede observar que la ecuación diferencial demuestra el rápido ascenso del crecimiento de los hidratos obteniendo ya una altura superior a las 3 pulgadas hasta 3,4. Lo que significa que se debe hacer un tratamiento de eliminación y limpieza para evitar taponamiento este crecimiento es debido a las condiciones climáticas a la que se somete el ducto.

4.4 BALANCE DE ENERGÍA EN TÉRMINOS DE PRESIÓN Y VELOCIDAD

Se utiliza la siguiente ecuación planteada en el anterior capítulo:

$$T_i^{(n+1)} = \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{v}{\Delta x} \right]^{-1} \left\{ \left[\frac{1}{\rho C_p \Delta t} + \frac{\beta}{C_p} \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{v}{\Delta x} \right) \right] p_i^{(n+1)} - \frac{v}{C_p} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{v}{\Delta x} \right] v_i^{(n+1)} + \frac{T_i^{(n)}}{\Delta t} \right. \\ \left. + \frac{v}{\Delta x} T_{i-1}^{(n+1)} - \left[\frac{1}{\rho C_p \Delta t} + \frac{\beta}{C_p} \right] p_i^{(n)} - \frac{\beta v}{C_p \Delta x} p_{i-1}^{(n+1)} + \frac{v}{C_p \Delta t} v_i^{(n)} \right. \\ \left. + \frac{v v}{C_p \Delta x} v_{i-1}^{(n+1)} - \frac{v g \sin \theta}{C_p} - \frac{q \pi d}{C_p \rho A_p} + \frac{S_{E,hyd}}{C_p} \right\}$$

Se tienen los siguientes valores estándar:

$$H_g = 896,5 \frac{kJ}{mol}$$

Para la densidad de la mezcla entre gas e hidrato

$$\rho = \rho_g H_g + \rho_w H_w + \rho_{hyd} H_{hyd}$$

Para el Cp de la mezcla gas e hidrato:

$$C_p = \frac{\rho_g H_g C_{p,g} + \rho_w H_w C_{p,w}}{\rho}$$

Para la velocidad promedio de la mezcla de gas e hidrato:

$$v = \frac{\rho_g H_g v_g + \rho_w H_w v_w + \rho_{hyd} H_{hyd} v_{hyd}}{\rho} = \frac{\rho_g v_{Sg} + \rho_w v_{Sw} + \rho_{hyd} v_{Shyd}}{\rho}$$

CP gas 10.440 kcal/m³

4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se muestran los siguientes resultados en función a los objetivos planteados caracterizando aspectos positivos y negativos:

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ASPECTOS POSITIVOS	ASPECTOS NEGATIVOS
Desarrollar un modelo integral de cinética de hidratos y transición de régimen de flujo para predecir la formación y transportabilidad de hidratos en sistemas de ductos dominados por gas.	Se pudo desarrollar efectivamente los modelos con ecuaciones diferenciales analizando las variables de presión temperatura y sobre todo la más importante que es la altura de formación dentro el ducto.	Son muchos modelos que se necesita una suficiente capacidad de matemática y física para poder entenderlos. Se recomienda que los futuros investigadores desarrollen modelos simplificados que consideren muchas variables.
Predecir cuándo y dónde se formarán tapones de hidratos en determinados tramos de ductos de gas con el modelo propuesto.	Con estos modelos se puede predecir desde cuándo y Hasta qué fecha Se incrementa la formación de hidratos en un determinado ducto.	Si uno establece una formación inicial y un área determinada se puede determinar pero todavía no existe un modelo para determinar de manera

		exacta el lugar de formación.
<p>Simular los mecanismos de formación y transportabilidad de hidratos en gasoductos a través del análisis de datos con un programa desarrollado en macros Excel.</p>	<p>Se pudo simular Y representar gráficamente en Excel los modelos pero se necesita tener una alta capacidad para poder interpretarlos</p>	<p>Las gráficas son algo complejas y no se tiene un dominio en Excel.</p>

Fuente: Elaboración propia en función al proyecto realizado, 2023



CAPÍTULO V: MARCO PROPOSITIVO

5.1 DEFINICIÓN DEL PROGRAMA DE CONTROL DE HIDRATOS CON LOS RESULTADOS DEL MODELO

5.1.1 Objetivos del programa

- Proponer una planilla para la gestión y control de daños y formación de hidratos en el gasoducto
- Proponer una planilla de gestión y planificación para evitar accidentes en el gasoducto.

5.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA

5.2.1 Plantilla métrica de calidad del Gasoducto

A continuación, se presenta el programa

Tabla 5. 1: Plantilla métrica de calidad del Gasoducto

MÉTRICA DE:			
PRODUCTO	X	PROYECTO	
FACTOR DE CALIDAD RELEVANTE: ESPECIFICAR CUÁL ES EL FACTOR DE CALIDAD RELEVANTE QUE DA ORIGEN A LA MÉTRICA.			
Nivel de odorización del gas natural en el gasoducto			
DEFINICIÓN DEL FACTOR DE CALIDAD: DEFINIR EL FACTOR DE CALIDAD INVOLUCRADO EN LA MÉTRICA YESPECIFICAR PORQUÉ ES RELEVANTE.			
El nivel de odorización debe ser suficiente de modo que pueda detectarse cualquier fuga de gas natural a lo largo del gasoducto, durante la habilitación y posterior a la puesta en servicio.			

<p>PROPÓSITO DE LA MÉTRICA: <i>ESPECIFICAR PARA QUÉ SE DESARROLLA LA MÉTRICA?</i></p>
<p>La métrica se desarrolla para medir el nivel de odorización del gas natural a lo largo del gasoducto y poder tomar las acciones correctas en forma oportuna.</p>
<p>DEFINICIÓN OPERACIONAL: <i>DEFINIR COMO OPERARÁ LA MÉTRICA, ESPECIFICANDO EL QUIÉN, QUÉ, CUÁNDO, DÓNDE, CÓMO?</i></p>
<p>El Supervisor de Estaciones es responsable de asignar un equipo de trabajo encargado de medir el nivel de odorización diariamente, a lo largo del gasoducto aplicando las técnicas de TBM y % de Gas en el aire. Las mediciones deben realizarse desde el inicio de la gasificación hasta 5 días después de alcanzar el nivel óptimo de odorización en el gasoducto y/o después de finalizada la gasificación.</p> <p>Asimismo, el supervisor de Estaciones reportará al equipo de proyecto los resultados obtenidos diariamente.</p>
<p>MÉTODO DE MEDICIÓN: <i>DEFINIR LOS PASOS Y CONSIDERACIONES PARA EFECTUAR LA MEDICIÓN.</i></p>
<ol style="list-style-type: none"> 1. Se aplicarán las técnicas de TBM y % de Gas en el aire en cada punto de control de nivel de odorización. 2. Se completarán formatos para registrar los valores obtenidos. 3. Se preparará un informe diario. 4. Se revisará el informe con el equipo de proyecto y se tomarán acciones preventivas y correctivas.
<p>RESULTADO DESEADO: <i>ESPECIFICAR CUÁL ES EL OBJETIVO DE CALIDAD O RESULTADO DESEADO PARA LA MÉTRICA.</i></p>
<ol style="list-style-type: none"> 1. Para la técnica A TBM se mide cuantitativamente los valores entre 6 y 9 mg/m³) 2. Para la técnica B (cualitativa) se debe percibir el olor cuando se tiene como máximo 0.9 % de gas en el aire.
<p>ENLACE CON OBJETIVOS ORGANIZACIONALES: <i>ESPECIFICAR CÓMO SE ENLAZA LA MÉTRICA Y EL FACTOR DE CALIDAD RELEVANTE CON</i></p>

LOS OBJETIVOS DE LA ORGANIZACIÓN.			
El cumplimiento de esta métrica es indispensable para poder operar el gasoducto bajo la regulación y estándares vigentes, lo cual garantiza una operación segura del sistema de distribución.			
RESPONSABLE DEL FACTOR DE CALIDAD: DEFINIR QUIÉN ES LA PERSONA RESPONSABLE DE VIGILAR EL FACTOR DE CALIDAD, LOS RESULTADOS DE LA MÉTRICA, Y DE PROMOVER LAS MEJORAS DE PROCESOS QUE SEAN NECESARIAS.			
La persona operativamente responsable de vigilar el factor de calidad, los resultados de la métrica, y de promover las mejoras de procesos que sean necesarias para lograr los objetivos de calidad planteados es el Supervisor de Estaciones.			
MÉTRICA DE:			
PRODUCTO		PROYECTO	X
FACTOR DE CALIDAD RELEVANTE: ESPECIFICAR CUÁL ES EL FACTOR DE CALIDAD RELEVANTE QUE DA ORIGEN A LA MÉTRICA.			
Rendimiento del Proyecto			
Capacidad del Proyecto			
Gasificación de la Red			
DEFINICIÓN DEL FACTOR DE CALIDAD: DEFINIR EL FACTOR DE CALIDAD INVOLUCRADO EN LA MÉTRICA Y ESPECIFICAR POR QUÉ ES RELEVANTE.			
El Rendimiento del Proyecto se refiere al cumplimiento del cronograma y presupuesto establecido, evitando desviaciones o eliminándolas mediante acciones preventivas o acciones correctivas.			
La capacidad del proyecto se define como el abastecimiento que ofrecerá cuando el proyecto entre en operación.			
La gasificación de la Red consiste en dejar operando la red con gas natural, lista para sudistribución.			
PROPÓSITO DE LA MÉTRICA: ESPECIFICAR PARA QUÉ SE DESARROLLA			

LA MÉTRICA
Monitorear y evaluar el estado y avance del cronograma con respecto a las líneas bases(Schedule y Presupuesto) para tomar decisiones oportunas, según sea el caso.
Obtener resultados de la disponibilidad o capacidad total en la entrega de suministro a clientes potenciales.
Conocer el avance de gasificación de los tramos o secciones de la red.
DEFINICIÓN OPERACIONAL: DEFINIR COMO OPERARÁ LA MÉTRICA, ESPECIFICANDO EL QUIÉN, QUÉ, CUÁNDO, DÓNDE, CÓMO?
Medir los indicadores de SPI y CPI para conocer el performance del proyecto en cualquier punto del ciclo de vida del proyecto.
Conocer la capacidad de entrega de gas natural en diferentes puntos de la red.
Registrar y documentar los avances de gasificación de todos los tramos de la red.
MÉTODO DE MEDICIÓN: DEFINIR LOS PASOS Y CONSIDERACIONES PARA EFECTUAR LA MEDICIÓN.
Realizar los cálculos matemáticos en base a la información recolectada para obtener los indicadores de performance del proyecto.
Medición de los caudales de entrega a los distintos puntos de la red.
Porcentaje de avance en función de los Kilómetros de red gasificados.
RESULTADO DESEADO: ESPECIFICAR CUÁL ES EL OBJETIVO DE CALIDAD O RESULTADO DESEADO PARA LA MÉTRICA.
Un valor del SPI y CPI lo más cercano posible a uno.
Obtener una capacidad total de 640 sm ³ /h.
Contar con el 100% del ducto gasificado.

Fuente: Elaboración propia en función a proyecto propuesto, 2023

5.2.2 Línea de base de calidad

Tabla 5. 2: Línea de base de calidad

LÍNEA BASE DE CALIDAD				
FACTO R DE CALIDA D RELEVA NTE	OBJETI VO DE CALIDA D	MÉTRI CA A US AR	FRECUE NCIA Y MOMEN TO DE MEDICI ÓN	FRECUE NCIA Y MOMEN TO DE REPOR TE
Rendimient odel Proyecto	0.90 < CPI	Indicador de Rendimie ntodel Costo	Cálculo semanaldel Indicador	Reporte semanal en las reuniones con el equipo del proyecto.
Rendimient odel Proyecto	0.90 < SPI	Indicador de Rendimie nto del Cronogra ma	Cálculo semanaldel Indicador	Reporte semanal en las reuniones con el equipo del proyecto.
Capacida d del Proyecto	Capacida d= 640,000 sm3/h	Indicador de flujo de gas natural en puntos de la	Cálculo diario, durante la habilitació	Reporte diario.

		red.	n	
Gasificación de Red	Gasificación = 100%	Porcentaje de avance por Kilometro de red gasificado	Cálculo diario, durante la gasificación	Reporte diario.

Fuente: Elaboración propia en función a proyecto propuesto, 2023

5.2.3 Matriz de actividad de calidad

Tabla 5. 3: Matriz de actividad de calidad

ENTREGABLE	ESTÁNDAR DE CALIDAD APLICABLE	ACTIVIDADES DE PREVENCIÓN	ACTIVIDADES DE CONTROL
1.1.1 Project Charter	Metodología de Gestión de Proyectos	Conocer las características y objetivos del Proyecto.	Aprobación de la Gerencia de Operaciones
1.1.2 Scope Statement	Metodología de Gestión de Proyectos	Identificar necesidad y requerimiento del Proyecto.	Aprobación de la Gerencia de Operaciones
1.2 Plan del Proyecto	Metodología de Gestión de Proyectos		Aprobación de la Gerencia de Operaciones
1.3 Informes	Metodología de	Presentación de	Aprobación de

deestado	Gestión de Proyectos	registros claros yentendibles.	la Gerencia de Operacione s
1.4 Reunión de coordinació n Semanal	Metodología de Gestión de Proyectos	Comunicación anticipada de las reuniones a asistir.	Revisión del PM
1.5 Cierre del proyecto	Metodología de Gestión de Proyectos	Finalizar todos los procesos y la documentación delProyecto.	Aprobación de la Gerencia de Operaciones
2.1 Despacho de materiales	Atención por necesidad	Identificación y planeamiento de materiales a utilizar.	Revisión del PM
2.2 Ejecución	Metodología de Gestión de Proyectos	Conocimiento a detalle del Plan de Gestión del Proyecto.	Aprobación de la Gerencia de Operaciones
3.1 Habilitación de Red de Acero	Formato de Avancede Habilitación	Conocimiento de especificacion estécnicas	Revisión del PM
3.2 Habilitación de Válvulas de bloqueo	Formato de Avancede Habilitación	Conocimiento de especificacion estécnicas	Revisión del PM
3.3 Habilitación del Sistema	Formato de Avancede Habilitación	Conocimiento de especificacion	Revisión del PM

		estéticas	
--	--	-----------	--

Fuente: Elaboración propia en función a proyecto propuesto, 2023

5.2.4 Política de control de calidad

Tabla 5. 4: Política de control de calidad

POLÍTICA DE CALIDAD DEL PROYECTO: ESPECIFICAR LA INTENCIÓN DE DIRECCIÓN QUE FORMALMENTE TIENE EL EQUIPO DE PROYECTO CON RELACIÓN A LA CALIDAD DEL PROYECTO.				
El presente proyecto debe de cumplir con los requisitos y requerimientos de calidad estipulados, cumpliendo para esto con el presupuesto y dentro del tiempo acordado.				
LÍNEA BASE DE CALIDAD DEL PROYECTO: ESPECIFICAR LOS FACTORES DE CALIDAD RELEVANTES PARA EL PRODUCTO DEL PROYECTO Y PARA LA GESTIÓN DEL PROYECTO. PARA CADA FACTOR DE CALIDAD RELEVANTE DEFINIR LOS OBJETIVOS DE CALIDAD, LAS MÉTRICAS A UTILIZAR, Y LAS FRECUENCIAS DE MEDICIÓN Y DE REPORTE.				
FACTOR DE CALIDAD RELEVANTE	OBJETIVO DE CALIDAD	OBJETIVO DE CALIDAD	MÉTRICA A UTILIZAR	FRECUENCIA Y MOMENTO DE MEDICIÓN Y DE REPORTE
Rendimiento del Proyecto	0.90 < CPI	Indicador de Rendimiento del Costo	Cálculo semanal del Indicador	Reporte semanal en las reuniones con el equipo del proyecto.

Rendimiento del Proyecto	0.90 < SPI	Indicador de Rendimiento del Cronograma	Cálculo semanal del Indicador	Reporte semanal en las reuniones con el equipo del proyecto.
Capacidad del Proyecto	Capacidad = 640,000 sm ³ /h	Indicador de flujo de gas natural en puntos de la red.	Cálculo diario, durante la habilitación	Reporte diario.
Gasificación de Red	Gasificación = 100%	Porcentaje de avance por Kilometro de red gasificado	Cálculo diario, durante la gasificación	Reporte diario.
PLAN DE MEJORA DE PROCESOS: ESPECIFICAR LOS PASOS PARA ANALIZAR PROCESOS, LOS CUALES FACILITARÁN LA IDENTIFICACIÓN DE ACTIVIDADES QUE GENERAN DESPERDICIO O QUE NO AGREGAN VALOR.				
1. Conocer el proceso.				
2. Identificar oportunidades de mejora del proceso.				
3. Recopilar información.				
4. Analizar el proceso con la información obtenida.				
5. Proponer mejoras al equipo del proyecto, mediante las reuniones semanales.				

6. Definir las acciones a realizar para implementar mejoras.
7. Verificar que las acciones sean exitosas.
8. Medir resultados y evaluar performance de implementación.
9. Comunicación al equipo del proyecto sobre mejora realizada.
10. Documentación de mejora.
MATRIZ DE ACTIVIDADES DE CALIDAD: <i>ESPECIFICAR PARA CADA PAQUETE DE TRABAJO SI EXISTE UN ESTÁNDAR O NORMA DE CALIDAD APLICABLE A SU ELABORACIÓN. ANALIZAR LA CAPACIDAD DEL PROCESO QUE GENERARÁ CADA ENTREGABLE Y DISEÑAR ACTIVIDADES DE PREVENCIÓN Y DE CONTROL QUE ASEGURARÁN LA OBTENCIÓN DE ENTREGABLES CON EL NIVEL DE CALIDAD REQUERIDO (VER MATRIZ ADJUNTA).</i>

Fuente: Elaboración propia en función a proyecto propuesto, 2023

5.2.5 Proceso para corregir problemas de formación de hidratos

Tabla 5. 5: Proceso para corregir problemas de formación de hidratos

NOMBRE DEL ROL
Sub Gerente de Mantenimiento
OBJETIVOS DEL ROL: <i>OBJETIVOS QUE DEBE LOGRAR EL ROL DENTRO DEL PROYECTO</i>
Persona que lidera el Proyecto y es el principal interesado en el éxito del proyecto, y por tanto es la persona que apoya, soporta, propone y defiende los intereses del proyecto.
RESPONSABILIDADES: <i>TEMAS PUNTUALES POR LOS CUALES ES RESPONSABLE (¿DE QUÉ ES RESPONSABLE?).</i>
Aprobar el Project Charter.
Aprobar el Scope Statement.
Aprobar el Plan de Proyecto.
Aprobar el cierre del proyecto.
Revisar los Informes de avance del Proyecto.

Revisar el Informe Final del Proyecto.	
FUNCIONES: <i>FUNCIONES ESPECÍFICAS QUE DEBE CUMPLIR (¿QUÉ DEBE REALIZAR PARA LOGRAR SUS OBJETIVOS Y CUBRIR SUS RESPONSABILIDADES?).</i>	
Iniciar el proyecto.	
Aprobar la planificación del proyecto.	
Monitorear el estado general del proyecto (actas de avance).	
Gestionar los temas contractuales.	
Asignar recursos al proyecto.	
Designar y empoderar al Project Manager.	
Ayudar en la solución de problemas y superación de obstáculos del proyecto.	
Concluir y cerrar el proyecto	
NIVELES DE AUTORIDAD: <i>QUÉ DECISIONES PUEDE TOMAR CON RELACIÓN AL ALCANCE, TIEMPO, COSTO, CALIDAD, RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES, PLANES Y PROGRAMAS, INFORMES Y ENTREGABLES, ADQUISICIONES, CONTRATOS, PROVEEDORES, ETC.</i>	
Decide sobre recursos humanos y materiales asignados al proyecto.	
Decide sobre modificaciones a las líneas base del proyecto.	
Decide sobre planes y programas del proyecto.	
REPORTA A: <i>A QUIÉN REPORTA DENTRO DEL PROYECTO.</i>	
SUPERVISA A: <i>A QUIÉNES SUPERVISA DENTRO DEL PROYECTO.</i>	
Project Manager	
REQUISITOS DEL ROL: <i>QUÉ REQUISITOS DEBEN CUMPLIR LAS PERSONAS QUE ASUMAN EL ROL.</i>	
CONOCIMIENTOS: <i>QUÉ TEMAS, MATERIAS, O ESPECIALIDADES DEBE CONOCER, MANEJAR O DOMINAR.</i>	- Gestión de Proyectos y Habilitación de infraestructuras con gas natural.

	- Aspectos normativos y regulatorios de gas natural.
HABILIDADES: <i>QUÉ HABILIDADES ESPECÍFICAS DEBE POSEER Y EN QUÉ GRADO.</i>	- Liderazgo - Comunicación - Negociación - Motivación - Solución de Conflictos
EXPERIENCIA: <i>QUÉ EXPERIENCIA DEBE TENER, SOBRE QUÉ TEMAS O SITUACIONES, Y DE QUÉ NIVEL.</i>	Más de 10 años de experiencia en el rubro de energía. Manejo de grandes grupos de personas.
OTROS: <i>OTROS REQUISITOS ESPECIALES TALES COMO GÉNERO, EDAD, NACIONALIDAD, ESTADO DE SALUD, CONDICIONES FÍSICAS, ETC.</i>	-
NOMBRE DEL ROL	
Equipo del Proyecto	
OBJETIVOS DEL ROL: OBJETIVOS QUE DEBE LOGRAR EL ROL DENTRO DEL PROYECTO (PARA QUÉ SE HA CREADO EL ROL).	
Es el grupo de personas encargado de realizar los planes del proyecto para lograr los objetivos del proyecto.	
RESPONSABILIDADES: TEMAS PUNTUALES POR LOS CUALES ES RESPONSABLE (¿DE QUÉ ES RESPONSABLE?).	
Desarrollar el Plan del Proyecto.	
Desarrollar los entregables del Proyecto.	
FUNCIONES: FUNCIONES ESPECÍFICAS QUE DEBE CUMPLIR (¿QUÉ DEBE REALIZAR PARA LOGRAR SUS OBJETIVOS Y CUBRIR SUS	

<i>RESPONSABILIDADES?).</i>	
Documentar los avances del Proyecto	
Ejecutar los trabajos de los Planes del Proyecto	
Identificar mejoras en los procesos.	
NIVELES DE AUTORIDAD: <i>QUÉ DECISIONES PUEDE TOMAR CON RELACIÓN AL ALCANCE, TIEMPO, COSTO, CALIDAD, RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES, PLANES Y PROGRAMAS, INFORMES Y ENTREGABLES, ADQUISICIONES, CONTRATOS, PROVEEDORES, ETC.</i>	
<i>Desarrollar los entregables con los recursos asignados</i>	
REPORTA A: <i>A QUIÉN REPORTA DENTRO DEL PROYECTO.</i>	
Project Manager	
SUPERVISA A: <i>A QUIÉNES SUPERVISA DENTRO DEL PROYECTO.</i>	
REQUISITOS DEL ROL: <i>QUÉ REQUISITOS DEBEN CUMPLIR LAS PERSONAS QUE ASUMAN EL ROL.</i>	
CONOCIMIENTOS: <i>QUÉ TEMAS, MATERIAS, O ESPECIALIDADES DEBE CONOCER, MANEJAR O DOMINAR.</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Gestión de Proyectos - Conocimientos Técnicos
HABILIDADES: <i>QUÉ HABILIDADES ESPECÍFICAS DEBE POSEER Y EN QUÉ GRADO.</i>	-
EXPERIENCIA: <i>QUÉ EXPERIENCIA DEBE TENER, SOBRE QUÉ TEMAS O SITUACIONES, Y DE QUÉ NIVEL.</i>	-

Fuente: Elaboración propia en función a proyecto propuesto, 2023

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA

6.1 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA

6.1.1 Análisis FODA

A continuación representa el siguiente análisis de fortalezas oportunidades debilidades y amenazas sobre el estudio y levantamiento de datos de la evaluación de formación de hidratos con nueva metodología.

Tabla 6. 1 Análisis FODA

FORTALEZA	DEBILIDADES
<ul style="list-style-type: none">➤ Se puede calcular el tiempo de formación de hidratos sin ningún laboratorio indirectamente desde gabinete sin necesidad de estar en campo.➤ Excelente control y manejo de datos.➤ Existe personal totalmente capacitado para la programación de métodos cuantitativos en macros Excel.➤ La idea es innovadora.➤ Se cuenta con Tecnología adecuada (computadoras, compresores, válvulas)	<ul style="list-style-type: none">❖ No conocer bastante sobre softwares de control formación de hidratos se sigue utilizando software convencional (HYSYS)❖ Se debe seguir periodos estrictos de actualización e implica un costo.❖ Falta de presupuesto para Innovación y compra de Software .

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Existen profesionales que se capacitan a diario para el control de formación de hidratos. ➤ Relativamente económico 	
<p>OPORTUNIDADES</p>	<p>AMENAZAS</p>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Material a bajo costo. ✓ Innovación y diversificación. ✓ La información es fácil de llevar y manipular 	<ul style="list-style-type: none"> • Variedad en los costos de operación • Pueden existir nuevos softwares más sencillos para la cuantificación de formación de hidratos . • Se puede extraer información fácilmente • Si no se sigue un período de mantenimiento en los Gasoductos, el modelo predictivo queda obsoleto

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de predicción de hidratos ,

2023

6.2 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA

6.2.1 Costos fijos

A continuación, se presentan los costos fijos considerando los costos de simulación y los costos de los equipos en los gasoductos:

Tabla 6. 2 Análisis de costos fijos

COSTOS FIJOS EN BOLIVIANOS		
	Mensual	Tipo
COSTOS FIJOS		
SERVICIOS BÁSICOS	10.000	Adm
MANO DE OBRA DIRECTA (MOD)	37.500	Adm
MANO DE OBRA INDIRECTA (MOI)	14.000	Adm
SEGURIDAD INDUSTRIAL	12.500	Adm
MANTENIMIENTO DE DUCTOS	30.000	Operativo
GASTOS GRALES. DE LEVANTAMIENTO DE DATOS	5.000	Admin
IMPUESTOS CONSULTORÍA	6000	
TOTAL COSTO FIJO MES	115.000	

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de pérdida y propuesta, 2023

El costo fijo de levantamiento del proyecto para el mantenimiento y prevención de formación de hidratos mensual es de 115000 Bolivianos

6.2.2 Costos Variables sin control predictivo de hidratos

A continuación se presentan los costos variables considerando que no se controla la formación de hidratos en el tiempo

Tabla 6. 3 Costos variables

COSTOS VARIABLES [Bs]			
	Cantidad	V/r Unit	Mensual
COSTOS VARIABLES			
Accesorios	10	200,00	2.000
Válvulas	5	3.500,00	17.500
Filtros	5	1.400,00	7.000

Accesorios Loop	2	10.000,00	20.000
Compresor de aire	3	14.000,00	42.000
Daño por formación de hidratos	1624,5	17,50	28.479
Equipos de seguridad	8	1.000,00	8.000
Equipos electrónicos	6	4.000	24.000
TOTAL COSTO VARIABLE MES			148.979

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de pérdida y propuesta, 2023

El costo variable de levantamiento del proyecto para el mantenimiento y prevención con formación de hidratos sin aplicar el método predictivo de manera mensual es de 148979 Bolivianos

6.2.3 Estudio de TIR y VAN con formación descontrolada de hidratos

6.2.3.1 Estudio del Van con formación descontrolada de hidratos

Se puede desarrollar un proyecto de inversión cuando el valor actual neto total (VAN o NVP) de todos los flujos de efectivo es positivo, y un proyecto de inversión se rechaza cuando el VAN es negativo. Para calcular el VAN se determinan todos los flujos de efectivo y los flujos de efectivo futuros se recalculan al valor actual del dinero descontándolos por la tasa de interés. La fórmula que se suele mencionar para calcular el VAN es:

Ecuación 6. 1: Ecuación del VAN

$$VAN = -I_o + \sum_{t=0}^T \frac{X_t}{(1+r)^T}$$

Donde:

VAN = Valor Actual neto

I_o = Inversión inicial en \$us

FC = Flujo de efectivo de cada año en \$us cada año en \$us

r = interés en tanto por 1, en nuestro proyecto se considera 15% de interés en tanto por 1, en nuestro proyecto se considera 15%

El flujo de caja será la utilidad estimada en Bs como parte de los ingresos generados para el presupuesto generados por la venta de gas natural en el gasoducto en estudio. Se tiene Entonces el siguiente flujo de caja sin el proyecto aplicado, es decir con el incremento de hidratos sin control:

Tabla 6. 4 Flujo de caja con formación de hidratos descontrolada

	0	1	2	3
INGRESOS	-	Bs4.132.160, 00	Bs4.373.371, 52	Bs4.625.919, 98
(-)COSTOS	-	Bs1.496.400, 00	Bs1.566.730, 80	Bs1.640.367, 15
(=) UTILIDAD BRUTA	-	Bs3.635.760, 00	Bs3.806.640, 72	Bs3.985.552, 83
GASTOS DE VENTAS GAS	-	Bs210.000,00	Bs219.870,00	Bs230.203,89
GASTOS ADMINISTRACION	-	Bs807.000,00	Bs844.929,00	Bs884.640,66
(-) DEPRECIACION	-	Bs40.617,45	Bs40.617,45	Bs40.617,45
UTILIDAD OPERACIONAL	-	Bs2.578.142, 55	Bs2.701.224, 27	Bs2.830.090, 83
Gastos Financieros	-	Bs80.000,00	Bs64.000,00	Bs51.200,00
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	-	Bs2.498.142, 55	Bs2.637.224, 27	Bs2.778.890, 83
Provisión de Impuestos 32%	-	Bs482.141,51	Bs508.984,28	Bs536.325,93
UTILIDAD NETA	-	Bs2.016.001, 04	Bs2.128.239, 99	Bs2.242.564, 90
RESERVA LEGAL	-	Bs201.600,10	Bs212.824,00	Bs224.256,49

UTILIDAD DEL EJERCICIO	-	Bs 814.400,93	Bs 915.415,99	Bs 1.018.308,41
-------------------------------	---	------------------	------------------	--------------------

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de pérdida y propuesta, 2023

Por lo tanto proyectando el VAN para tres años se tiene:

$$VAN = -(148979 + 115000) * 12Bs * 3 + \frac{4132160}{(1 + 0.15)^1} + \frac{4373371,52}{(1 + 0.15)^2} + \frac{4625919,88}{(1 + 0.15)^3}$$

$$VAN = 438453$$

El proyecto está proyectado para su financiamiento en 2 años; por lo tanto, para hallar el VAN, recurrimos al siguiente criterio:

- Si $VAN > 0$ ES RENTABLE
- Si $VAN = 0$ ES INDIFERENTE
- Si $VAN < 0$ NO ES RENTABLE

Por lo tanto:

$$VAN = 438453 > 0 \text{ Por lo tanto es rentable}$$

6.2.3.2 Estudio del TIR con formación descontrolada de hidratos

La TIR se puede definir como la tasa de descuento a la que el valor presente de todos los flujos de efectivo futuros (o beneficios hipotéticos esperados monetizados) es igual a la inversión inicial, es decir, la tasa a la que una inversión se equilibra. Se puede utilizar para medir y comparar la rentabilidad de las inversiones.

El TIR se calcula con la siguiente fórmula:

Ecuación 6. 2: Ecuación del TIR

$$\sum_{n=0}^N \frac{FC}{(1 + TIR)^n} - I_o = 0$$

Reemplazando se tiene:

$$0 = -(148979 + 115000) * 12Bs * 3 + \frac{4132160}{(1 + TIR)^1} + \frac{4373371,52}{(1 + TIR)^2} + \frac{4625919,88}{(1 + TIR)^3}$$

Resolviendo:

$$9503244Bs = \frac{4132160}{(1 + TIR)^1} + \frac{4373371,52}{(1 + TIR)^2} + \frac{4625919,88}{(1 + TIR)^3}$$

Iterando se tiene:

Tabla 6. 5 Iteración del TIR

TIR SUPUESTO	VALOR "0" APROXIMADO
0,16	272721
0,17	111612
0,177	1492
0,17709	90

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de pérdida, 2023

Luego el TIR será igual a:

$$TIR = 17,709 \%$$

Por lo tanto, como el TIR es > a la Tasa de descuento de 15% (0,15). El proyecto es factible.

6.2.4 Análisis de costo y beneficio sin control de hidratos

La siguiente tabla puede usarse como indicador para determinar si los costos de implementación de predicción de hidratos tiene los siguientes beneficios:

Tabla 6. 6 Interpretación de Costo y beneficios

CRITERIO	DESCRIPCION	SIGNIFICADO
B/C > 1	Los ingresos son mayores que los egresos	El proyecto es aconsejable
B/C = 1	Los ingresos son iguales que los egresos	El proyecto es indiferente
B/C < 1	Los ingresos son menores que los egresos	El proyecto no es aconsejable

Fuente: Elaboración propia, 2023

Por lo tanto, usando la ecuación:

Ecuación 6. 3: Relación de Costo y Beneficio

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Beneficios}}{\text{Inversion inicial}}$$

Para los dos años de financiamiento:

$$\frac{B}{C} = \frac{4132160 * 3 Bs}{9503244 Bs}$$

$$\frac{B}{C} = 1,30$$

Sobra el 30 % del presupuesto planteado, por lo tanto el proyecto es factible ya que sobrar  dinero después sin la implementación del proyecto de hidratos., solo con mantenimiento.

6.2.5 Resumen de las variables de rentabilidad

Se tiene el siguiente recuadro que relaciona el TIR, el VAN y la relación de costos y beneficios:

Tabla 6. 7 Parámetros económicos

FLUJO DE CAJA LIBRE	
VALOR PRESENTE NETO	438453
TIR	17,709 %
Rel Ben / Costo	1,30

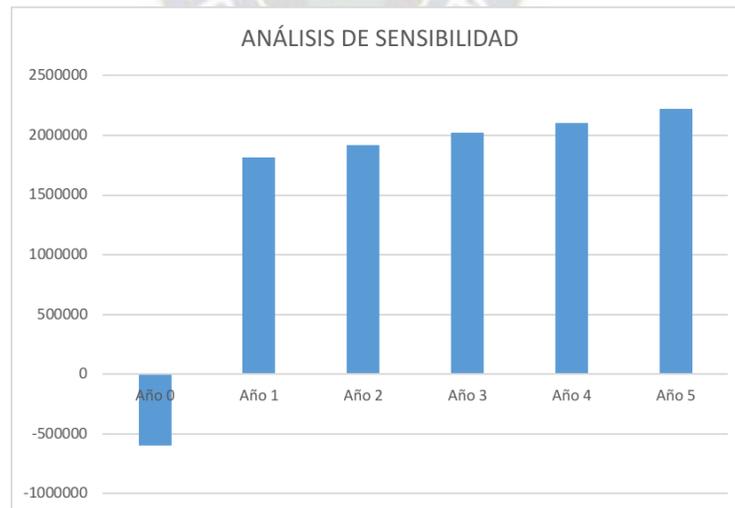
Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

Se observa que la relación costo beneficio es de 1,30 lo cuál la utilidad se puede afirmar que el proyecto se financiará en menos de 3 años y el TIR equivale al 17,71 % porque los costos estarán cubiertos cada año.

6.2.6 Análisis de sensibilidad con formación descontrolada de hidratos

A continuación, se representa gráficamente el flujo de caja la implementación del proyecto predictivo de formación de hidratos

Gráfica 6. 1 Análisis de sensibilidad sin implementación del sistema de predicción de hidratos



Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de perdida, 2022

Se puede observar en la anterior figura que la inversión se lo recupera rápidamente debido a los ingresos que se generan por regalías.

6.2.7 Costos Variables con formación de hidratos controlada

A continuación se presentan los costos variables considerando la disminución de los costos por la formación de hidratos en los gasoductos:

Tabla 6. 8 Costos variables con control de formación de hidratos

COSTOS VARIABLES [Bs]			
	Cantidad	V/r Unit	Mensual
COSTOS VARIABLES			
Accesorios	10	0,00	-
Válvulas	5	0,00	-
Filtros	5	0,00	-
Soldadura	1	10.000,00	10.000
Compresor de aire	2	14.000,00	28.000
Pérdida de Liquido	180	17,50	3.150
Equipos de seguridad	8	1.000,00	8.000
Equipos electrónicos	6	4.000	24.000
TOTAL COSTO VARIABLE MES			73.150

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de pérdida, 2022

Después de utilizar los equipos de instalación y reducir los volúmenes de pérdida el costo mensual disminuye a 73150 Bolivianos aproximadamente

6.2.8 Estudio de TIR y VAN con predicción controlada de formación de hidratos

6.2.8.1 Estudio del Van con predicción controlada de formación de hidratos

Para este nuevo cálculo de tir nos basamos en el nuevo flujo de caja con costos de mantenimiento reducidos a la implementación de la simulación y predicción de formación de hidratos:

Tabla 6. 9 Flujo de caja con predicción controlada de formación de hidratos

	0	1	2	3
INGRESOS	-	Bs4.132.160,00	Bs4.373.371,52	Bs4.625.919,98
(-)COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	-	Bs877.800,00	Bs919.056,60	Bs962.252,26
(=) UTILIDAD BRUTA	-	Bs4.254.360,00	Bs4.454.314,92	Bs4.663.667,72
GASTOS DE VENTAS	-	Bs210.000,00	Bs219.870,00	Bs230.203,89
GASTOS ADMINISTRACION	-	Bs807.000,00	Bs844.929,00	Bs884.640,66
(-) DEPRECIACION	-	Bs40.617,45	Bs40.617,45	Bs40.617,45
UTILIDAD OPERACIONAL	-	Bs3.196.742,55	Bs3.348.898,47	Bs3.508.205,72
Gastos Financieros	-	Bs80.000,00	Bs64.000,00	Bs51.200,00
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	-	Bs3.116.742,55	Bs3.284.898,47	Bs3.457.005,72
Provisión de Impuestos 32%	-	Bs601.531,31	Bs633.985,40	Bs667.202,10
UTILIDAD NETA	-	Bs2.515.211,24	Bs2.650.913,07	Bs2.789.803,61
RESERVA LEGAL	-	Bs251.521,12	Bs265.091,31	Bs278.980,36
UTILIDAD DEL EJERCICIO	-	Bs1.263.690,11	Bs1.385.821,76	Bs1.510.823,25

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de perdida y propuesta,

2023

Por lo tanto proyectando para tres años se tiene:

$$VAN = -(148979 + 73150) * 12Bs * 3 + \frac{4132160}{(1 + 0.15)^1} + \frac{4373371,52}{(1 + 0.15)^2} + \frac{4625919,88}{(1 + 0.15)^3}$$

$$VAN = 1945053$$

Por lo tanto:

$$VAN = 1945053 > 0 \text{ Por lo tanto es rentable}$$

El VAN con el proyecto implementado y la disminución de Los costos de mantenimiento es mucho más rentable que sin la propuesta realizada.

6.2.8.2 Estudio del TIR con predicción controlada de formación de hidratos

Reemplazando se tiene:

$$0 = -(148979 + 73150) * 12Bs * 3 + \frac{4132160}{(1 + TIR)^1} + \frac{4373371,52}{(1 + TIR)^2} + \frac{4625919,88}{(1 + TIR)^3}$$

Resolviendo:

$$7996644 = \frac{4132160}{(1 + TIR)^1} + \frac{4373371,52}{(1 + TIR)^2} + \frac{4625919,88}{(1 + TIR)^3}$$

Iterando se tiene:

Tabla 6. 10 Iteración del TIR con proyecto propuesto

TIR SUPUESTO	VALOR "0" APROXIMADO
0,26	350079
0,28	106710
0,289	1143
0,2891	-15

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de pérdida, 2023

Luego el TIR será igual a:

$$TIR = 28,91 \%$$

Por lo tanto, como el TIR es > a la Tasa de descuento de 15% (0,15). El proyecto propuesto es factible.

6.2.9 Análisis de costo y beneficio

Para los tres años de financiamiento con el control de hidratos se tiene

$$\frac{B}{C} = \frac{4132160 * 3 \text{ Bs}}{7996644 \text{ Bs}}$$

$$\frac{B}{C} = 1,55$$

Sobra el 55% presupuesto planteado, por lo tanto el proyecto es factible ya que sobraré dinero después de la implementación del proyecto en la recuperación de tres años.

6.2.10 Resumen de las variables de rentabilidad

Se tiene el siguiente recuadro que relaciona el TIR, el VAN y la relación de costos y beneficios:

Tabla 6. 11 Parámetros económicos con predicción controlada de formación de hidratos

FLUJO DE CAJA LIBRE	
VALOR PRESENTE NETO	1945053
TIR	28,91 %
Rel Ben / Costo	1,55

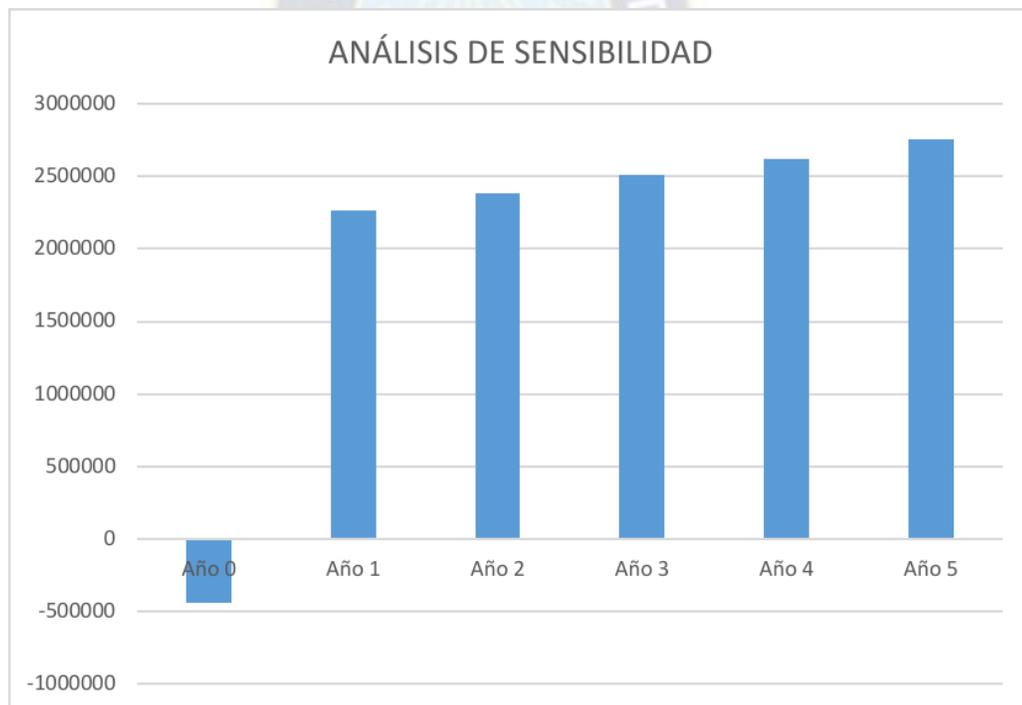
Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

Se observa que la relación costo beneficio es de 1,55 lo cuál la utilidad se puede afirmar que es alta y afirmar que el proyecto se financiará en menos de tres años y el TIR equivale al 28,91 % porque los costos estarán cubiertos cada año.

6.2.11 Análisis de sensibilidad con pérdidas controladas de líquido

A continuación se representa gráficamente el flujo de caja viendo cómo crecen los ingresos con formación de hidratos en gasoductos estandarizados y controlados:

Gráfica 6. 2 Análisis de sensibilidad con implementación de proyecto



Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de perdida y propuesta, 2023

Se observa entonces que al implementar el proyecto de control reducen Los costos de mantenimiento Y también el mismo es factible y rentable en el lapso de tres años

CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- Se ha logrado explicar detalladamente los conceptos fundamentales del fenómeno físico de la formación de hidratos en gasoductos.
- Se ha podido desarrollar el modelo integral de cinética de hidratos y transición de régimen de flujo para predecir la formación y transportabilidad de hidratos en sistemas de ductos dominados por gas.
- Se ha predecido cuándo y dónde se formarán tapones de hidratos en determinados tramos de ductos de gas con el modelo propuesto.
- Se simuló geoméricamente los mecanismos de formación y transportabilidad de hidratos en gasoductos a través del análisis de datos con un programa desarrollado en macros Excel.
- Al realizar el estudio de factibilidad técnica se puede afirmar de que el proyecto tiene más ventajas que desventajas y eso es bueno a nivel industrial y posteriormente económicamente el proyecto es factible ya que no existe muchos costos en el análisis y los costos operativos son menores.
- Finalmente se puede afirmar que se logró predecir la formación de hidratos en tuberías de gas natural aplicando la teoría de transición de régimen de flujo.

7.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar un software que cuantifique la formación de hidratos en las estaciones de control para evitar problemas el control y seguridad industrial ya que es muy difícil controlar hidratos a lo largo del tramo y es necesario realizar simulaciones y controlar los periodos de incremento de la masa de hidratos al realizar el chancheo de los ductos. Con este parámetro de masa se puede modelar el crecimiento matemáticamente y crear modelos con ecuaciones diferenciales para evitar utilizar modelos antiguos que ya no son factibles en estas épocas de tecnología avanzada.



BIBLIOGRAFÍA

Guevara & Bouza (2013), Evaluación de modelos rigurosos para la predicción de hidratos de gas natural. Universidad Simón Bolívar. Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia. Caracas, Venezuela.

M. a. L. S. Arivazhagan, «Entropy Generation Minimization of Shell and Tube Heat Exchanger with Porous Medium,» *Experimental Techniques*, vol. I, nº 10.1111, pp. 1567-1747, 2011.

Pérez Porto, J., Gardey, A. (2018). Gasoducto – Qué es, definición y concepto. Definicion.de. Última actualización el 25 de enero de 2019. Recuperado el 19 de mayo de 2023 de <https://definicion.de/gasoducto/>

S. Z. a. Z. S. M. Shuja, «Thermoeconomic Considerations in the Design and Analysis of a Finned Heat Sink Array: The Effect of Material Cost,» *International Journal of Exergy*, vol. III, nº 9, pp. 370-387, 2011.

Rubio (2020), Modelo matemático para predecir condiciones de formación de hidratos de gas natural. Coordinación General de Estudios de Posgrado, UNAM, Tesis y cosechado de Repositorio de la Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información

Virna Nardone, María Müller, Alexis Bouza, Yamilet Sánchez, Jenny Montbrun (2009), Evaluación de modelos empíricos para la predicción de hidratos de gas natural. Universidad Simón Bolívar. Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia. Caracas, Venezuela

ANEXOS

Equipos que se encuentran dentro del gasoducto GAA



Ductos de GAA



UNIV. Ruddy Ariel Ricaldi Medina

Correo Electrónico: ruddy2910@gmail.com

Celular: 76540550



DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-4331/2023 La Paz, 7 de Diciembre del 2023

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha 30 de Noviembre del 2023, por RUDDY ARIEL RICARDI MEDINA con C.I. N° 9191781 LP, con número de trámite DA 2388/2023, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: "PREDICCIÓN DE FORMACIÓN DE HIDRATOS EN TUBERÍAS DE GAS NATURAL APLICANDO LA TEORÍA DE TRANSICIÓN DE RÉGIMEN DE FLUJO", cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración".

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece "Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios".



"2023 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO"

Oficina Central - La Paz
Av. Potosí, N° 915,
entre Esp. Uruguay y
C. Mariscal Sucre.
Telf.: 22090000
senapi - senapi

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
pedreguería (sigep),
N° 21, 101, Alcantara.
Telf.: 22090000 - 22090000

Oficina - Cochabamba
Calle Bolivia, N° 137,
entre H. de Julio y Andaraca.
Telf.: 22090000 - 22090000

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2016
101, Multicentro El Gallo
Edif. Piso 1, Of. 101,
Zona H. de Julio.
Telf.: 22090000 - 22090000

Oficina - Oruro
Calle Bolívar y N° 101
101, Multiplaza El Gallo
Edif. Piso 1, Of. 101,
Zona Parque Bolívar.
Telf.: 22090000

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calle San Trigo y Avenida
101, Santa Cruz, N° 101,
Telf.: 22090000

Oficina - Sucre
Calle 4 de Octubre N° 101
entre Apurícha y Norte,
Calle Central, Of. 101,
Telf.: 22090000

Oficina - Potosí
Av. Villalón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. 101, Salinas N° 101,
Potosí, Potosí, Of. 101,
Telf.: 22090000

www.senapi.gob.bo

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley Nº 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*.

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ..."*, por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

RESUELVE:



INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"PREDICCIÓN DE FORMACIÓN DE HIDRATOS EN TUBERÍAS DE GAS NATURAL APLICANDO LA TEORÍA DE TRANSICIÓN DE RÉGIMEN DE FLUJO"**, a favor del autor y titular: **RUDY ARIEL RICARDI MEDINA** con C.I. Nº **9191781 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

Abg. Roberto Illich García-Herrera
DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS a.i.
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL

RIC/ata
c.c.Arch.



"2023 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO"

Oficina Central - La Paz
Av. Montes, Nº 916,
entre Esq. Urugua y
C. Batallón Illimani.
Telf.: 220950
220951 - 220951

Oficina - Santa Cruz
Av. Urugua, Calle
penalización Quijano,
Nº 99, Edif. Bicentenario.
Telf.: 309954 - 309955

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, Nº 797,
entre 14 de Julio y Andezca.
Telf.: 4444441 - 4444442

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo I, Nº 950
-Edif. Multicentro El Ceibo
Lda. Pina y, Of. 511,
Zona 16 de Julio.
Telf.: 244001 - 244009

Oficina - Ortopedista
Calle Kilometro 2, Nº 966
Edif. enj. Trinidadella,
Zona Parque Bolívar.
Telf.: 2200981

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calle 100 Trigo y Avenida
Edif. Santa Clara, Nº 161,
Telf.: 2205286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre Nº 583P
entre Apacacha y Juarez,
Calle Central, Nº. 16,
Telf.: 4200088

Oficina - Potosí
Av. Villalón entre calles
Bicentenario Alba y San Alberto,
Edif. AM, Salinas Nº 26,
Primer Piso, Of. 11,
Telf.: 2201060