

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA PETROLERA



**OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO EN
EL CAMPO CAMBEITI A TRAVÉS DE ESTRATEGIAS DE
CONTROL NO LINEAL VISCOPLÁSTICO**

Proyecto de grado Presentado para la Obtención del Grado de Licenciatura en
Ingeniera en Petróleo Gas y Procesos

POR: EDDY FRANZ CUSSI TITO

TUTOR: ING. HERMAS HERRERA CALLEJAS

LA PAZ - BOLIVIA

2024



**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.

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a Dios y mi familia, especialmente a mis padres quienes me apoyaron durante todo este tiempo tanto económicamente y apoyo moral, así también dedico este trabajo a mi tutor ingeniero Hermas Herrera Callejas por su conocimiento impartido. Ya que todos me inculcaron valores, cultivados tanto en mi hogar como en la universidad en estos años de aprendizaje de los mismos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios quien siempre me guía, así también el apoyo, el constante aliento e incondicional esfuerzo que realizaron mis señores padres para poder lograr esta meta que estoy alcanzando a nivel académico y personal, agradezco de igual manera a mi tutor Ingeniero Hermas Herrera Callejas por su constante aliento y enseñanzas en el transcurso de la carrera así también al plantel docente, jefe de carrera Reynaldo Marín los cuales impartieron su experiencia, sabiduría en este transcurso por la universidad, por otra parte, a mis tribunales por la corrección y la guía de ellos para la elaboración de mi proyecto a todos muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

SIMBOLOGÍA	1
RESUMEN EJECUTIVO	2
CAPITULO I: GENERALIDADES	6
1.1 INTRODUCCIÓN.....	6
1.2 ANTECEDENTES.....	7
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.3.1 Identificación del problema.....	9
1.3.2 Formulación del problema	11
1.4 OBJETIVOS	11
1.4.1 Objetivo general	11
1.4.2 Objetivos específicos.....	11
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	12
1.5.1 Justificación técnica.....	12
1.5.2 Justificación económica.....	12
1.5.3 Justificación ambiental	12
1.6 ALCANCES.....	13
1.6.1 Alcance temático	13
1.6.2 Alcance geográfico	13
1.6.3 Alcance temporal.....	13
CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN DEL CAMPO DE PRODUCCIÓN	15
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL CAMPO	15
2.1.1 Descripción del estrato Productor.....	19
2.1.2 Ubicación de los pozos en el campo	21
2.1.3 Radio de drenaje de los pozos	21
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS POZOS	21
CAPITULO 3: TEORÍA DE LA VISCOSIDAD	24
3.1 INTRODUCCIÓN.....	24

3.2	CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS	27
3.2.1	Propiedades independientes del tiempo.....	29
3.2.1.1	Líquidos pseudoplásticos o adelgazantes de cizallamiento	30
3.2.1.2	Fluidos Visco-plásticos.....	32
3.2.1.3	Líquidos dilatantes o espesantes de cizallamiento.....	34
3.2.2	Propiedades dependientes del tiempo	36
3.2.2.1	Fluidos tixotrópicos.....	37
3.2.2.2	Fluidos reopecticos	38
3.3	MODELO DE SIMULACIÓN.....	39
3.4.1	La Ley de Darcy	40
3.4.2	Ecuaciones de conservación de masas	40
3.4.3	Ecuación de conservación de energía.....	41
3.4.4	Presión capilar.....	42
3.4.5	Restricciones de composición de fase	43
3.4.6	Restricciones de equilibrio de fase	43
3.3	MODELO MATEMATICO DE FLUJO.....	45
CAPITULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA.....		51
4.1	REPRESENTACIÓN DE LOS MODELOS CON MATLAB	54
CAPITULO V ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD		65
5.1	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA	65
5.1.1	Análisis FODA	65
5.2	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	66
5.2.1	Costos fijos.....	66
5.2.2	Costos Variables	67
5.2.3	Depreciación anual del proyecto	68
5.2.4	Inversión inicial del proyecto	68
5.2.5	Flujo de caja con pérdidas iniciales de líquido	69
5.3	ESTUDIO DE TIR Y VAN	70
5.3.1	Estudio del Van	70
5.3.2	Estudio del TIR.....	72

5.4 ANÁLISIS DE COSTO Y BENEFICIO	73
5.5 RESUMEN DE LAS VARIABLES DE RENTABILIDAD	74
6 CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
6.1 CONCLUSIONES.....	75
6.2 RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFIA	77
ANEXOS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1: Mapa isopáquico del campo Cambeiti</i>	9
<i>Figura 1-2: Ubicación del Proyecto</i>	14
<i>Figura 2.1: Mapa estructural del campo Cambeiti</i>	15
<i>Figura 2.2: Corte estructural del campo Cambeiti</i>	17
<i>Figura 2.3: Estratigrafía general del Sub-Andino</i>	18
<i>Figura 2.4: Mapa paleográfico del devónico superior</i>	19
<i>Figura 2.5: Estudio de resistividad</i>	20
<i>Figura 2.6: Esquema del campo Cambeiti</i>	21
<i>Figura 2.7: Pozo CBT-X2 Arenisca Cambeiti</i>	23
<i>Figura 3.1: Esquema de flujo cortante unidireccional thixotrópico</i>	28
<i>Figura 3.3: Representación cualitativa del comportamiento aparente de viscosidad para un fluido adelgazante de cizallamiento</i>	30
<i>Figura 3.4: Curva de viscosidad cualitativa para un fluido de engrosamiento cizallamiento</i>	35
<i>Figura 3.5: Comportamiento cualitativo de la tasa de cizallamiento de cortica para materiales tixotrópicos y reopéticos</i>	37
<i>FIGURA 4.1 Solubilidad vs Temperatura</i>	54
<i>FIGURA 4.2 Solubilidad vs Temperatura</i>	55
<i>FIGURA 4.3 Radio vs Tiempo</i>	56
<i>FIGURA 4.4 Fraccion Parafinica vs Tiempo</i>	57
<i>FIGURA 4.5 Radio VS Tiempo</i>	58
<i>FIGURA 5.6 Parafina vs Tiempo</i>	59
<i>FIGURA 4.7 Espesor vs Longitud Axial</i>	60
<i>FIGURA 4.8 Espesor vs Longitud Axial</i>	61
<i>FIGURA 4.9 Variación de Temperatura vs Longitud Axial</i>	62
<i>FIGURA 4.10 Espesor vs Longitud Axial</i>	63

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1 Producción acumulada del campo Cambeiti</i>	8
<i>Tabla 2.1: Pozos perforados en el campo Cambeiti</i>	21
<i>Tabla 2.2: Estado actual de los pozos en el campo Cambeiti</i>	22
<i>Tabla 4.1: Análisis de los estudios reológicos y de flujo del petróleo del área del campo CAMBEITI temperatura inicial del embalse</i>	46
Tabla 5. 1: Análisis FODA	65
Tabla 5. 2: Análisis de costos.....	66
Tabla 5. 3: Depreciación anual del proyecto	68
Tabla 5. 4: Capital de trabajo	69
Tabla 5. 5: Flujo de caja	69
Tabla 5. 6: Flujo de caja por año para demostrar el VAN.....	71
Tabla 5. 7: Interpretación de Costo y beneficios	73
Tabla 5. 8: Parámetros económicos.....	74

SIMBOLOGÍA

τ_0^B :	Limite Plástico.
$\eta\gamma_{yx}$:	Plástico Especifico en la teoría de visco plásticos.
$kA \frac{\Delta p}{\mu L}$:	Ley de Dary.
$n_{c,\alpha}, n_\alpha$:	Numero de moles en base de la Fracción molar.
Kw, Ko, Kg, Kr :	Conductividades térmicas.
$K_{c,\alpha_1,\alpha_2} = \frac{x_{c,\alpha_1}}{x_{c,\alpha_2}}$:	Relación de las fracciones molares de un componente en sus dos fases.
$T_{crit} = \left(\frac{a^2}{b}\right)^{\frac{2}{3}}$:	Temperatura Critica en base al factor de compresibilidad.
$p_{crit} = \frac{T_{crit}}{b}$:	Presión Critica en base al factor de compresibilidad.
μ_{oi} :	Viscosidad del petróleo.
μ_w :	Viscosidad del Agua.
$k_{rw}(S_w)$:	Permeabilidad Relativa en base la saturación del agua.
ΔP :	Diferencial de presión.
K_T :	Conductividad Termica.
$f(\gamma_{yx})$:	Tasa de Cizallamiento.
P_c :	Diferencia de presión a través de la interfaz entre dos fluidos inmiscibles.
ρ_g :	Densidad de la fase gaseosa.
ρ_{oi} :	Densidad de la fase de petróleo.
k_{rocw} :	Permeabilidad Relativa del petróleo.

RESUMEN EJECUTIVO

La viscosidad es la propiedad de los fluidos de oponerse al movimiento cuando es aplicado sobre ellos un esfuerzo para transportarlos de un punto a otro. El petróleo presenta una alta viscosidad, mayor a 1000 cp. lo que hace que sea difícil de transportarlo. En el presente trabajo se muestra un modelo matemático para la predicción de la viscosidad de petróleos producidos.

La producción de petróleo en Bolivia depende ampliamente de los campos maduros, quedando en el yacimiento un 70% de hidrocarburos después de haberse extraído por la energía natural del mismo, por lo que, para poder producir ese remanente, es necesario aplicar algún procedimiento que ayude a aumentar el factor de recuperación tal como los métodos EOR

Los procesos de recuperación mejorada de petróleo, conocidos como EOR por sus iniciales en inglés (Enhanced Oil Recovery), incluyen métodos que usan fuentes externas de energía y fluidos que no están presentes en el yacimiento, para alterar el comportamiento físico-químico del sistema roca-fluidos con el fin de incrementar la cantidad de petróleo recuperado.

Uno de los métodos EOR más utilizados en el mundo es la inyección cíclica de vapor, sin embargo, este es un proceso relativamente nuevo.

La inyección cíclica o alternada de vapor es uno de los procesos térmicos cuya base teórica es el efecto de la temperatura sobre la viscosidad del petróleo. Debido a que la productividad de un pozo es inversamente proporcional a la viscosidad del petróleo, la reducción en ella lleva a un incremento en la producción del pozo.

Para el desarrollo del trabajo se recolectaron 25 muestras de petróleo, a las que se les midió la viscosidad a 5 temperaturas diferentes, además de la gravedad API y el porcentaje de asfaltenos.

Los datos fueron introducidos en el paquete estadístico Statgraphics Centurion XVI y mediante análisis de regresión múltiple se obtuvieron dos modelos matemáticos, 1) lineal múltiple y 2) no lineal múltiple; seleccionándose el mejor modelo según su coeficiente de determinación R^2 y el error relativo medio (ERM). El modelo seleccionado se comparó con los modelos de Glaso, Bennison y Naseri. Se obtuvo como el mejor, el modelo no lineal múltiple con R^2 de 0,9792 y ERM de 5,05%, superando los modelos de Glaso (35,5% ERM), Bennison (107,5% ERM) y Naseri (61,7% ERM). Palabras clave: viscosidad; petróleo pesado; regresión; modelo matemático.

ABSTRACT

Viscosity is the property of fluids to oppose movement when an effort is applied to transport them from one point to another. Oil has a high viscosity, greater than 1000 cp, which makes it difficult to transport. This paper presents a mathematical model for predicting the viscosity of produced oil.

Oil production in Bolivia depends largely on mature fields, with 70% of hydrocarbons remaining in the reservoir after being extracted by its natural energy. Therefore, in order to produce this remainder, it is necessary to apply some procedure that helps increase the recovery factor, such as EOR methods.

Enhanced oil recovery processes, known as EOR for its initials in English (Enhanced Oil Recovery), include methods that use external sources of energy and fluids that are not present in the reservoir, to alter the physical-chemical behavior of the rock-fluid system in order to increase the amount of oil recovered.

One of the most widely used EOR methods in the world is cyclic steam injection, however, this is a relatively new process.

Cyclic or alternating steam injection is one of the thermal processes whose theoretical basis is the effect of temperature on oil viscosity. Because the productivity of a well is inversely proportional to the viscosity of the oil, the reduction in it leads to an increase in the well's production.

For the development of the work, 25 oil samples were collected, which were measured for viscosity at 5 different temperatures, in addition to the API gravity and the percentage of asphaltenes.

The data were entered into the statistical package Statgraphics Centurion XVI and through multiple regression analysis two mathematical models were obtained, 1) multiple linear and 2) multiple non-linear; the best model was selected according to

its coefficient of determination R^2 and the mean relative error (MRE). The selected model was compared with the Glaso, Bennison and Naseri models. The nonlinear multiple model with R^2 of 0.9792 and ERM of 5.05% was obtained as the best, surpassing the models of Glaso (35.5% ERM), Bennison (107.5% ERM) and Naseri (61.7% ERM). Keywords: viscosity; heavy oil; regression; mathematical model.

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las perspectivas futuras del desarrollo global del complejo energético y de combustibles del mundo están asociadas con el petróleo de alta viscosidad. Por lo tanto, el desarrollo de tecnologías y las decisiones de diseño para controlar el desarrollo de yacimientos petrolíferos de alta viscosidad deben ser de naturaleza no convencional. Esto está relacionado en gran medida con la posibilidad de que el petróleo en flujo manifieste propiedades peculiares de los sistemas no newtonianos.

Se han elaborado varias ecuaciones constitutivas para describir el comportamiento de los materiales viscoplásticos. Se pueden encontrar descripciones completas de estos modelos en varios libros (Wilkinson 1960; 1987; 1997; Khasanov y Bulgakova 2003; 2005; Chhabra y Richardson 2008; 2012) y artículos de revisión (Bird et al. 1983; 2001; Mitsoulis 2007).

Los estudios reológicos han demostrado que la desviación de la ley de Newton de fricción viscosa y, en concreto, la violación de la proporcionalidad entre la tensión de corte y la velocidad de deformación es que 'c' es, en otras palabras, la existencia de la tensión de corte crítica (tensión de fluencia) τ_0 . Tales efectos acompañan al flujo de líquido viscoso con propensión a la formación de una estructura interna similar a la de un sólido. Las ecuaciones más comunes que se han utilizado para describir los aceites con tensión de fluencia son las de Bingham.

La interrelación de los parámetros reológicos es algo más compleja en la mayoría de los casos por esta razón; esta es la diferencia esencial con los fluidos con propiedades plásticas, y la fluidez es una característica variable de la sustancia, ya que se basa en su velocidad de deformación (Bernadiner y Entov 1975; Khasanov y Bulgakova, 2003). El flujo de fluido viscoplástico se describe mediante los

parámetros reológicos: tensión de fluencia s_0 y viscosidad dinámica l (o parámetros de no linealidad n y K). Si la tensión de corte s es menor que la tensión de fluencia s_0 , el flujo es imposible, es decir, las tasas de deformación por tensión de corte corresponden a los tipos de flujo pseudoplástico($n-1$) o dilatante($n1$). En muchos casos, la interrelación de los parámetros reológicos resulta ser más intrincada, lo que nos hace pensar que: la fluidez de los medios viscoplásticos es la variable característica de la sustancia, ya que depende de su tasa de deformación (Bernadiner y Entov 1975; Khasanov y Bulgakova, 2003).

Los autores (Devlikamov et al. 1975) establecieron experimental y teóricamente que, bajo condiciones viscoplásticas no lineales, el aceite contiene dos tensiones de corte críticas: la tensión s_r , en la que comienza el comienzo de la destrucción y el deterioro de la estructura interna del aceite, y la tensión s_m , en la que se produce la destrucción completa. En este caso, la corriente de petróleo que pasa a través de un capilar o un poro se trata de forma continua, sin prestar atención a los procesos de reestructuración que intervienen en este proceso, que emergen en la pared del canal en contacto con el petróleo y dan lugar a capas marginales.

En capítulos posteriores, se analizarán en profundidad los fundamentos de los modelos viscoplásticos y la lógica misma de su aplicación para la recuperación secundaria.

1.2 ANTECEDENTES

El campo de Cambeiti, que está bajo operación de Repsol-YPF E&P Bolivia, se encuentra en una etapa de producción bastante madura y las reservas restantes calculadas son muy marginales. Se incluye dentro de los campos marginales ya que la producción de hidrocarburos de los yacimientos explotados se mantiene en actividad continua y no se puede realizar una nueva acumulación de reservas de otros yacimientos o áreas de los campos para reemplazarla.

La Serranía de Charagua es un tren estructural largo, conformado por varias culminaciones algunas que son: Abapó, Muchirí, Guariri, Saipurú, Ancasoro, Parapetí, CAMBEITI e Itatiqui.

Algunos estudios geológicos de superficie se realizaron en diferentes momentos y recomendaron la perforación del pozo Cambeiti (CBT-X2) en 1976, que dio la dirección para el descubrimiento de petróleo. El año en que comenzaron a rodar los commodities fue en 2010 cuando se perforó el pozo Cambeiti-X3 (CMB-X3). Así, como antes fluyó petróleo de los mismos yacimientos de la Formación Iquiri, se recordará que esto ocurrió en 2010 y que se trataba de volúmenes comerciales.

El Pozo CBT – X2 alcanzó una profundidad total de 1454 metros penetrando el único pozo que se había perforado que cubría la sección superior de la Formación Los Monos. Los yacimientos que producen a una profundidad promedio de entre 1200 – 1350 metros son poco profundos.

Se han perforado diez pozos de explotación en el campo petrolero de la Formación Iquiri, y estos son los niveles: Cambeiti, DIQ -1, DIQ - 2, DIQ -3, DIQ -4, DIQ -5.

A continuación, apreciaremos la producción acumulada del campo es la siguiente:

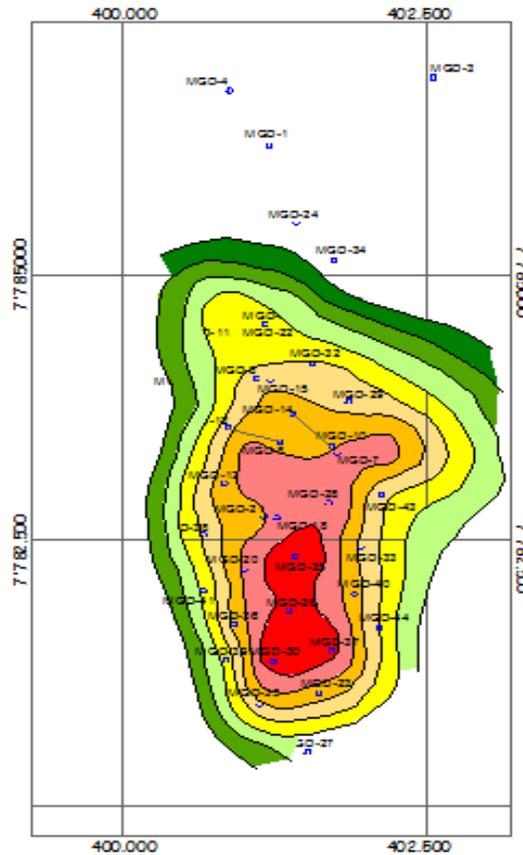
Tabla 0.1 Producción acumulada del campo Cambeiti

	PETROLEO (BBL)	GAS (MPC)
Reservorio Cambeiti	1014205	3691978
Reservorio DIQ	171658	26535189
TOTAL	1185863	30227167

Fuente: Elaboración propia

Cambeiti es un pliegue anticlinal alargado, ligeramente asimétrico, su eje axial tiene una orientación en general Norte-Sur.

Figura 0.1: Mapa isopáquico del campo Cambeiti



Fuente: Agencia nacional de hidrocarburos, Dirección de Exploración y Explotación 2015

El mapa estructural, muestra en detalle la configuración de la estructura y se observa que los niveles productores se encuentran en el bloque bajo de las fallas Cambeiti y Don Bosco, estas no inciden en la distribución de los fluidos en los reservorios.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1 Identificación del problema

El fluido inyectado se suele calentar antes de que llegue a la superficie durante el proceso de vaporización cíclico. Normalmente, el vapor se genera mediante calderas convencionales de un solo paso o instalaciones de cogeneración que

producen vapor y electricidad. Estos generadores están completamente equipados con centros de control para controlar los parámetros más importantes, como el flujo de gas combustible, el aire de combustión, el exceso de oxígeno y la calidad del vapor.

Se instalan con una configuración muy eficiente junto con la recirculación de gases de escape y quemadores de combustión por etapas para lograr bajas emisiones de NOx.

Las pérdidas de calor desde el cabezal hasta las formaciones suprayacentes y subyacentes sobre el yacimiento pueden ser graves en algunos casos cuando los pozos son profundos, cuando están mal aislados térmicamente o cuando se utilizan tasas de inyección bajas. El vapor líquido saturado (húmedo) es difícil de medir, ya que es tanto líquido como gas y, por lo tanto, se inyecta "a ciegas" en los pozos petrolíferos en la mayoría de las operaciones actuales.

El petróleo extraído es similar al ciclo de inyección de vapor en términos de tecnología de estimulación, que mejora su producción pesada al minimizar la viscosidad y, por lo tanto, reduce el tiempo de explotación en el yacimiento al tiempo que aumenta la recuperación.

Inyección de vapor de corto plazo: La primera fase corresponde a la inyección de vapor de corto plazo o etapa en la que se inyecta vapor en la formación por un período que va desde una a varias semanas. La duración depende de las características del yacimiento. En esta etapa también se producen pérdidas de calor en todo el sistema de inyección.

Tiempo de condensación de largo plazo: La segunda etapa corresponde a una interrupción en la condensación del vapor inyectado al ser lo suficientemente prolongada para ceder su calor latente al petróleo y la formación.

La tercera etapa del ciclo implica el retorno del pozo a la línea de venta y producción continua cuando se ha alcanzado el caudal de pre-estimulación o uno superior. La

duración del tiempo asociado a esta fase de producción está vinculada al período requerido para que el yacimiento se enfríe hasta su temperatura inicial. Al final de la misma, según los resultados de las pruebas, se puede realizar una repetición del ciclo iniciando el proceso para que continúe repitiéndose ciclo tras ciclo hasta que se alcance algún límite de explotación económica.

1.3.2 Formulación del problema

¿De qué manera se podrá representar un proceso de inyección de vapor para la producción de crudo a través del modelo visco plástico?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Controlar la viscosidad de la producción de crudo del campo Cambeiti mediante el modelo no lineal viscosplástico de flujo

1.4.2 Objetivos específicos

- Generar un modelo simplificado de bajo costo computacional, para determinar las condiciones finales de calidad de vapor, presión y temperatura en la inyección cíclica de vapor en función a la viscosidad del crudo.
- Verificar modelos para generar una solución que integre sólo las características físicas del yacimiento, de la tubería y las condiciones iniciales de la inyección de vapor tales como: presión, temperatura y calidad de vapor.
- Programar los métodos en una hoja de cálculo
- Crear un modelo matemático viscoplástico que sea función de la temperatura y la calidad de vapor con el fin de obtener la presión

- Realizar una simulación con los modelos definidos utilizando wólfram matemática

1.5 JUSTIFICACIÓN

1.5.1 Justificación técnica

Podemos predecir modelos viscoplásticos en un yacimiento durante la producción de petróleo para obtener tasas óptimas de inyección de vapor o cualquier otro líquido para disminuir la viscosidad. Es fundamental implementar y desarrollar nuevas técnicas de ingeniería mediante simulación, ya que un gran número de empresas en todo el mundo se dedican a este análisis.

1.5.2 Justificación económica

Conocer bien los tiempos óptimos en los periodos de los métodos de inyección y los caudales de vapor permite trazar planes económicos en cuanto a la gestión de los costes y gastos que requiere este método de recuperación secundaria. Conocer bien los caudales mínimos de vapor se traducirá en una reducción de los costes de los procesos dentro de la ingeniería de producción. Una vez reducidos estos costes, significará que la empresa será más rentable y por tanto obtendrá mayores beneficios en el futuro.

1.5.3 Justificación ambiental

Evaluar las repercusiones ambientales del proceso de inyección de agua como método secundario de recuperación de hidrocarburos y describir el impacto. Las viscosidades y los incrementos de las mismas dentro de un yacimiento permiten definir los periodos en los que se deben realizar inyecciones de agua en el yacimiento y por ende diseñar estrategias para evitar daños ambientales.

Considerar la normatividad ambiental y el impacto que producirá la implementación del método de flujo viscoplástico no lineal.

1.6 ALCANCES

1.6.1 Alcance temático

El proyecto de tesis se centra principalmente en la mejora de dos sectores fundamentales de la carrera profesional de la ingeniería petrolera: la ingeniería de producción, la ingeniería de yacimientos y la simulación matemática de modelos. Todos ellos surgirán en el análisis de la inyección de vapor y el análisis de la viscosidad dentro del yacimiento, pero la columna vertebral de este trabajo es el desarrollo de modelos matemáticos como una herramienta complementaria para estos sectores.

En contraste, se emplearán cálculos numéricos asistidos por el simulador matemático Wolfram para derivar las cantidades óptimas a partir de la viscosidad establecida a través de los modelos.

1.6.2 Alcance temporal

El proyecto se realizará este año, desde el mes de enero hasta finales de noviembre, dentro de la ciudad de La Paz con datos obtenidos de la empresa YPF.

1.6.3 Alcance geográfico

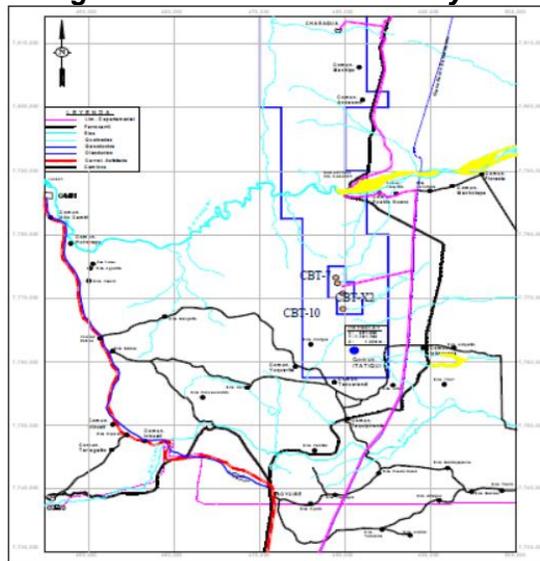
El proyecto planteado se realizará en la siguiente localización:

- Localidad: Cambeiti
- Provincia: Cordillera

- Departamento: Santa Cruz
- Ubicación Fisiográfica: Subandino externo.
- Distancia: 92 Km al Este de la localidad de Camiri en línea recta.

En la siguiente imagen veremos la ubicación del proyecto:

Figura 0-2: Ubicación del Proyecto



Fuente: Agencia nacional de hidrocarburos, Dirección de Exploración y Explotación 2015

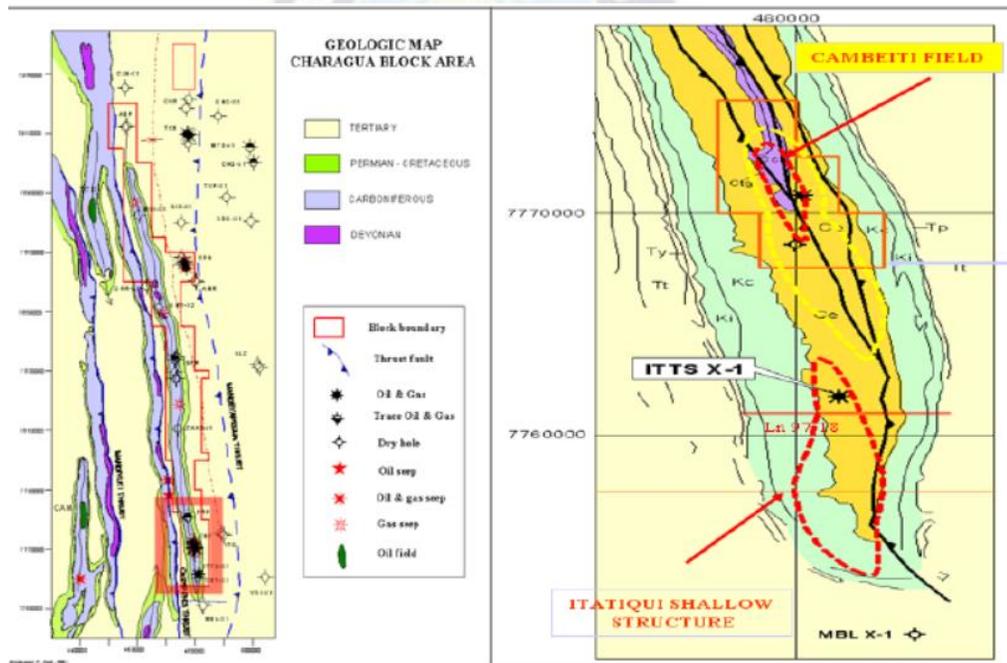
CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN DEL CAMPO DE PRODUCCIÓN

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL CAMPO

El largo braquianticlinal que conforma la serranía de Charagua está constituido por varias culminaciones, siendo una de ellas la de Cambeiti, ubicada en la porción más meridional de este máximo estructural¹.

Se verá a continuación el mapa estructural:

Figura 2.1: Mapa estructural del campo Cambeiti



Fuente: Agencia nacional de hidrocarburos, Dirección de Exploración y Explotación 2015

Esta estructura es un pliegue alargado y relativamente estrecho, de rumbo general Noroeste-Sudeste dentro del lineamiento estructural de Ancasoro-Charagua-

¹ La culminación de Cambeiti es una trampa independiente, con cierres bien definidos, el Sur es evidente por el hundimiento regional del lineamiento de Charagua, en cambio el Norte apenas se insinúa en superficie, pero se lo deduce por el estrechamiento de los flancos en las cabeceras de las quebradas Taremacua y N° 5 que definen la silla estructural que vincula Cambeiti y Parapetí.

Guariri-Muchiri, que constituye el frente oriental de la faja subandina en la zona. Es asimétrico, con su flanco occidental más suave que el oriental, abierto en sedimentitas carbónicas de la Formación Chorro. Está afectado en toda su longitud por la Falla Don Bosco, inversa y con un rechazo de 215 metros para el tope T-2.

Las fallas longitudinales inversas y de alto ángulo de buzamiento, Cambeiti, de buzamiento al Oeste, e Itatique, de buzamiento al Este, fracturan sus flancos y por sus divergentes buzamientos, configuran un bloque bajo en forma de cuña, dando lugar al cobijamiento de los reservorios del Iquiri y a los prospectables del Huamampampa. Estas fallas se resuelven en sedimentitas pelíticas de Los Monos sin afectar aparentemente los objetivos profundos (Huamampampa y Santa Rosa).

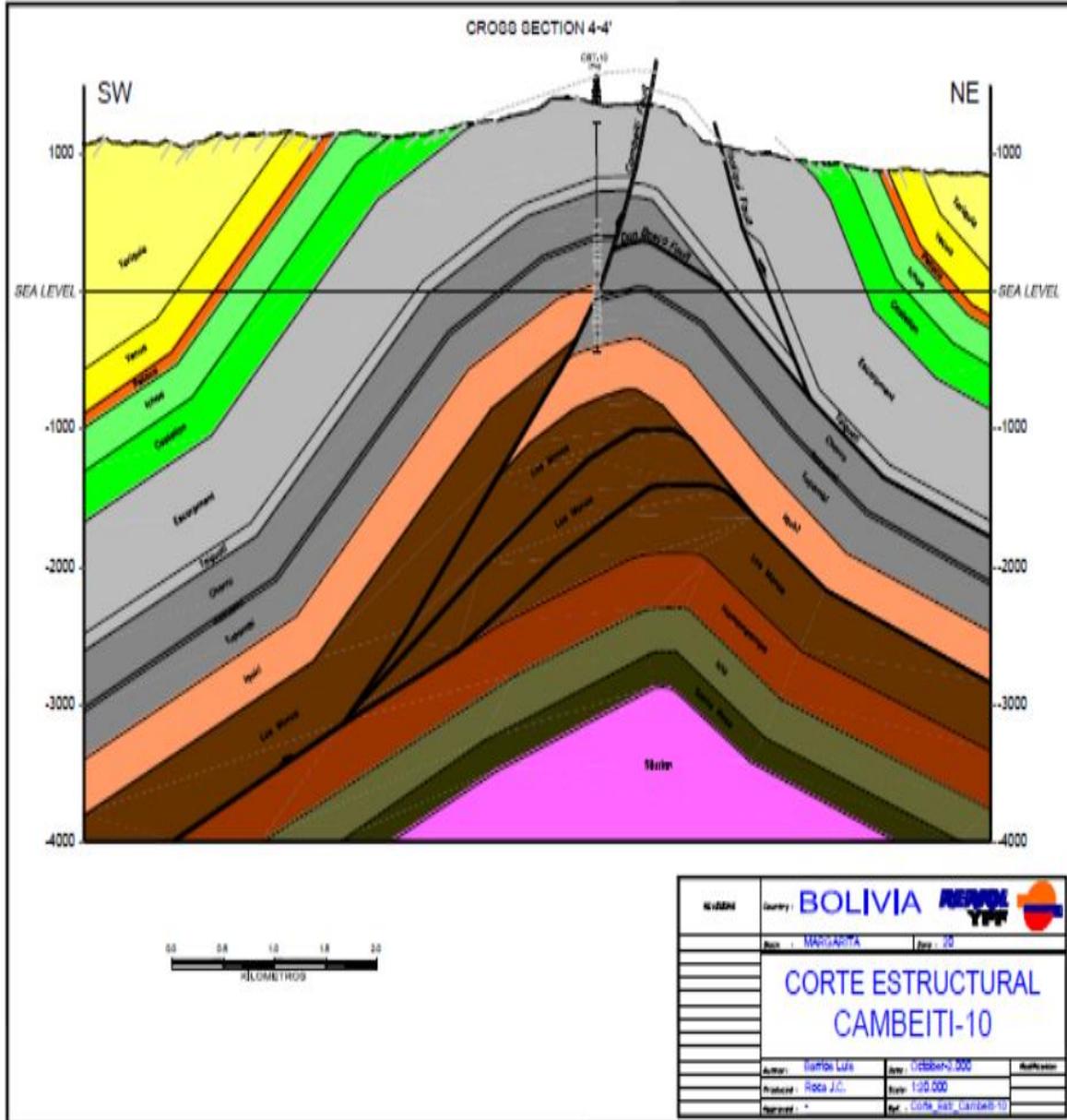
La estructura Cambeiti está situada en la provincia Cordillera, Departamento Santa Cruz, constituyendo la culminación meridional del lineamiento estructural de Charagua. Dicha culminación tiene suave el flanco Occidental y parado el Oriental, presentándose asimétrica en el extremo Sur.

En el curso del año 1923 Standard Oil Company perforó el pozo CBT-X1 en las cabeceras de la Quebrada Itatique, estructuralmente en el hundimiento Sur de la culminación meridional. Alcanzó una profundidad de 804,7 metros, en la parte inferior de la formación Chorro, sin llegar a la formación Iquiri.

En base a los datos aportados por la perforación del primer pozo se efectuó una reinterpretación integral de la estructura incluyendo no solo el Iquiri, sino también otros posibles objetivos en Huamampampa y en la Formación Santa Rosa. La tectónica interpretada mostró fallas de tipo inverso en ambos flancos de la estructura, de las cuales solamente una afectaría el pozo en profundidad (Falla Don Bosco).

En la siguiente imagen se verá el corte estructural y la clase de fallas que existen:

Figura 2.2: Corte estructural del campo Cambeiti



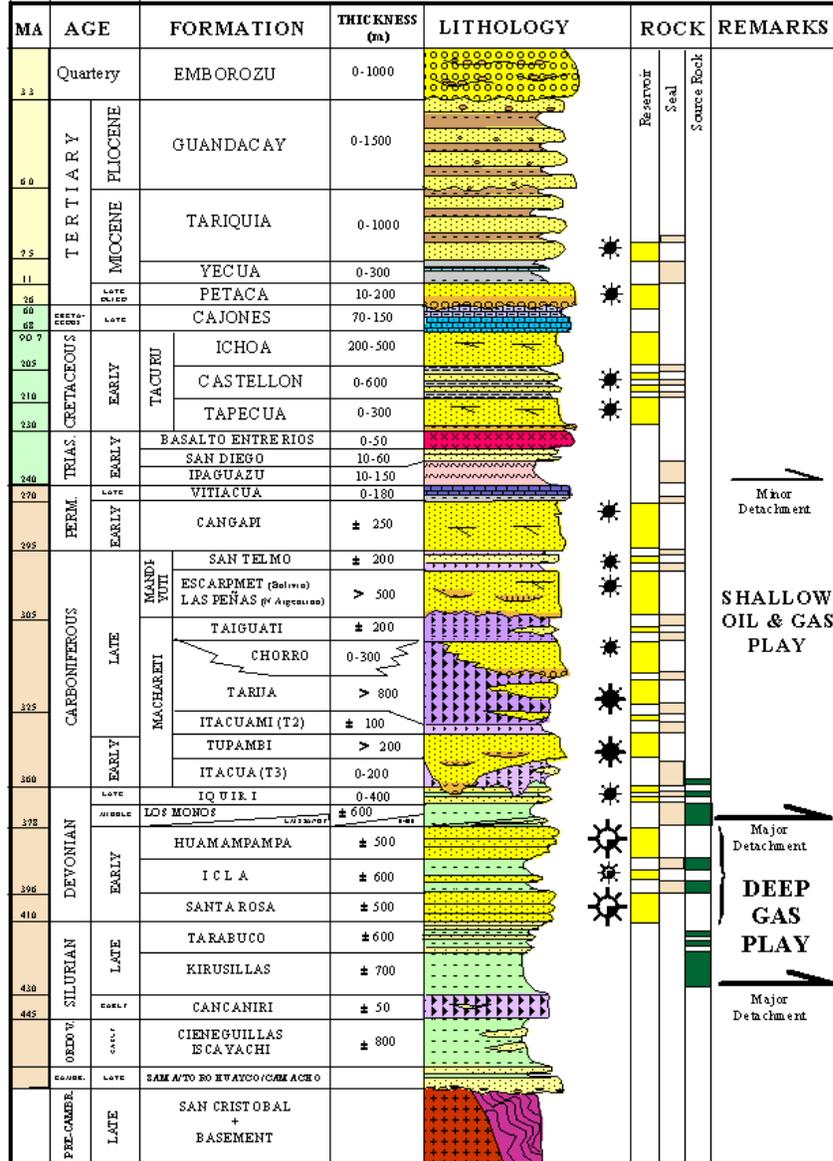
Fuente: Agencia nacional de hidrocarburos, Dirección de Exploración y Explotación 2015

2.1.1. Estratigrafía de la Formación

En el área geológica del Campo Cambeiti se interpreta una secuencia estratigráfica resumida en el gráfico a continuación:

Figura 2.3: Estratigrafía general del Sub-Andino

SUB ANDEAN GENERAL STRATIGRAPHY

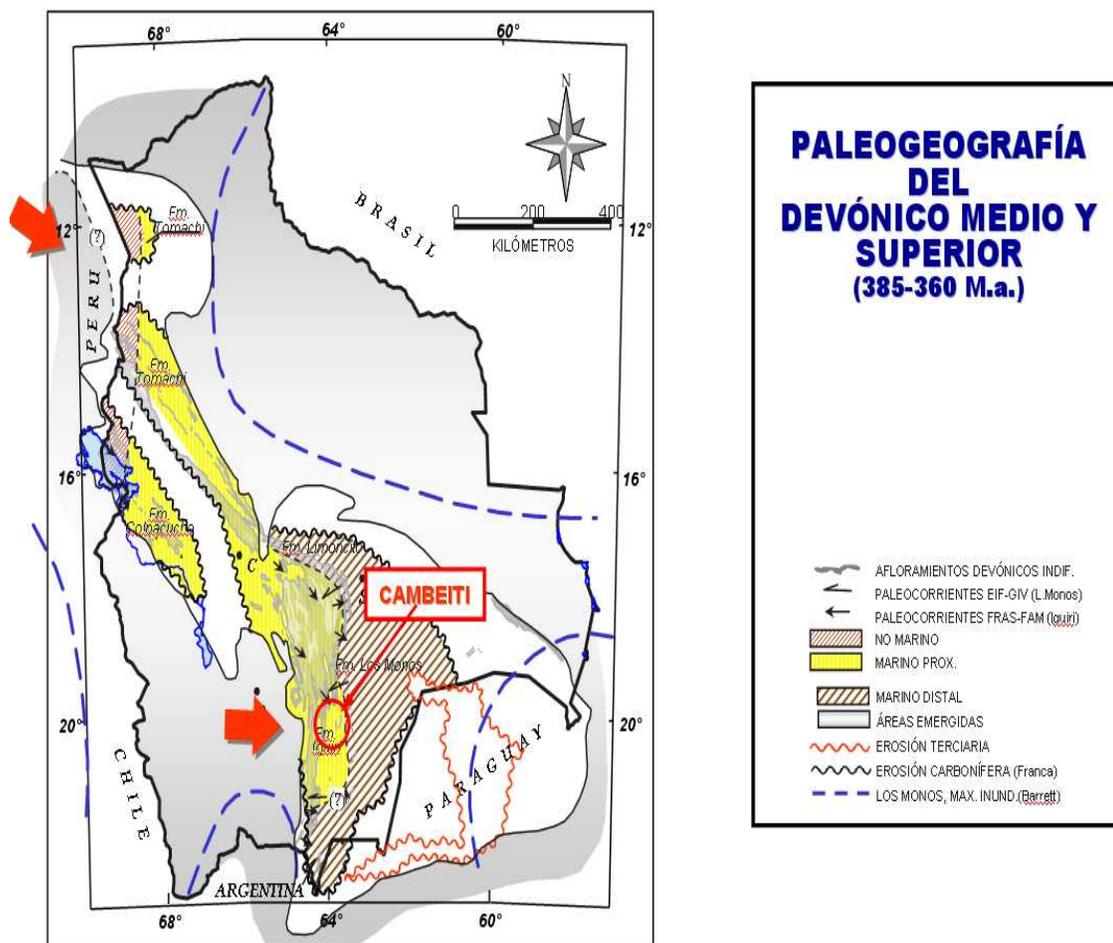


Fuente: Programa de Trabajo y Presupuesto Repsol 2015

El principal interés hidrocarburífero del campo se centra en las unidades devónicas y carboníferas. Se interpreta para el devoniano una dinámica de sedimentación marino proximal (Emsiano-fameniano) a continental (Misissipiano), que a partir del carbonífero Inferior (Tournaisiano) manifiesta una clara influencia glacial.

A continuación, se observará el mapa paleogeográfico del devónico superior para ubicar el campo en específico:

Figura 2.4: Mapa paleogeográfico del devónico superior



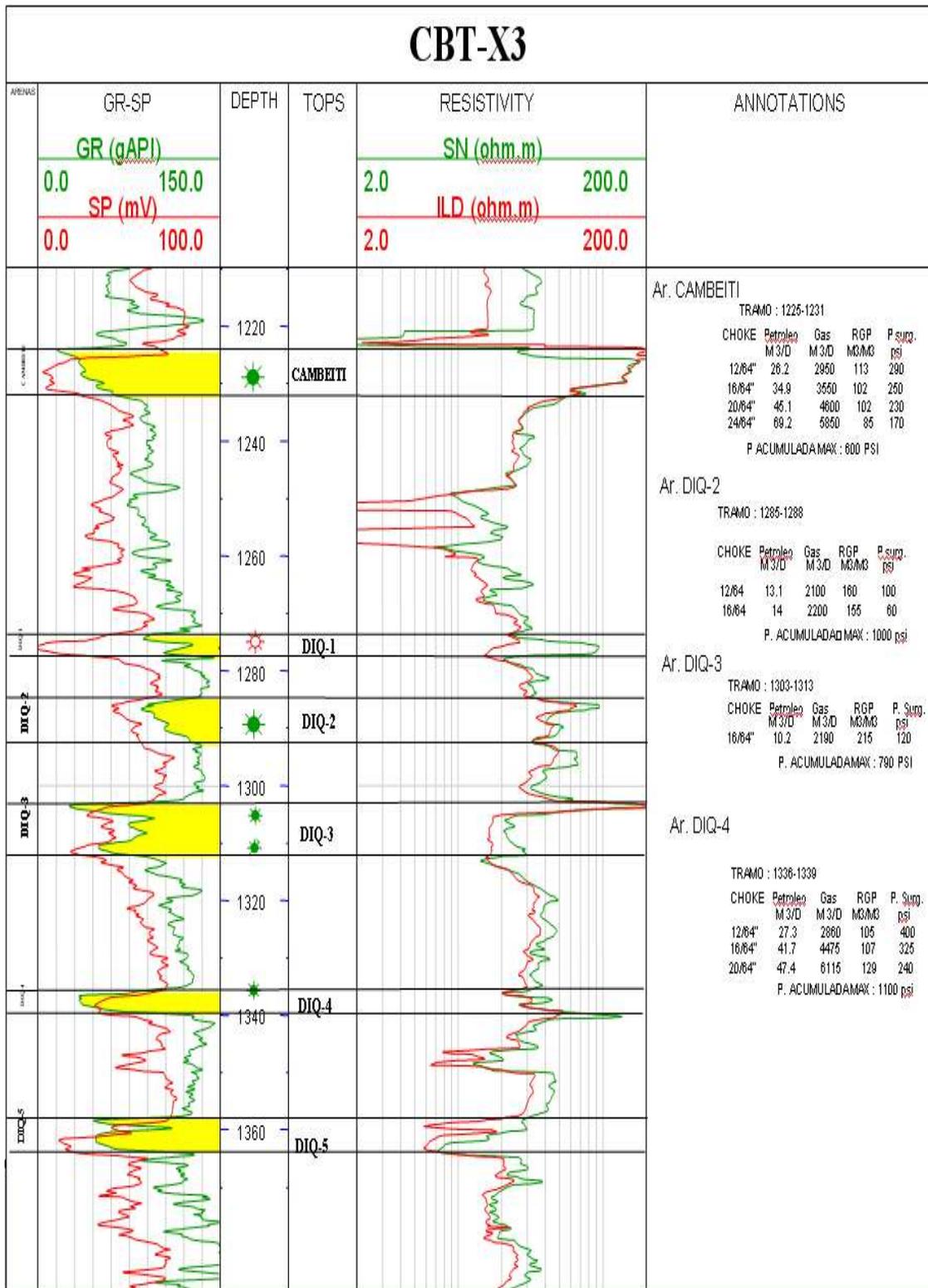
Fuente: Programa de Trabajo y Presupuesto Repsol 2015

2.1.1 Descripción del estrato Productor

En el Campo Cambeiti propiamente dicho, se tiene particular interés en los depósitos de la formación Iquiri, la cual es la principal productora del campo.

En la siguiente imagen se podrá apreciar el registro de resistividad:

Figura 2.5: Estudio de resistividad

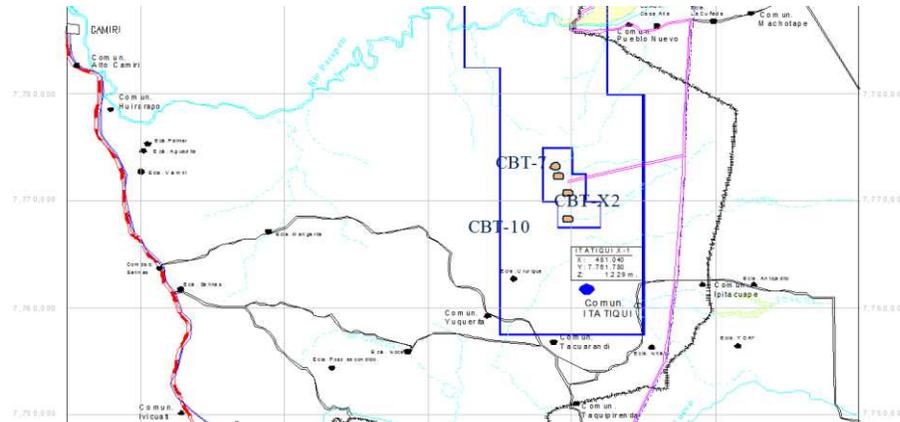


Fuente: Programa de Trabajo y Presupuesto Repsol 2015

2.1.2 Ubicación de los pozos en el campo

Se esquematiza a continuación un plano general de ubicación de los pozos del Campo Cambeiti.:

Figura 2.6: Esquema del campo Cambeiti



Fuente: Programa de Trabajo y Presupuesto Repsol 2015

2.1.3 Radio de drenaje de los pozos

Se asume para este campo, un radio de drenaje teórico de 250 metros sobre la base de la distancia que separa un pozo del otro.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS POZOS²

Se verá a continuación el detalle de cada uno de ellos y su estado:

Tabla 2.1: Pozos perforados en el campo Cambeiti

Nº de Pozos	Bloque	Campo	Pozo	Prof. Final (mbbp)	Inicio de Producción	Formación	Estado Actual	EST	Motivo	Fecha de Abandono	ARREGLO PRODUCTO
1	CAMBEI TI	CAMBEI TI	CBT-001	805	30-jun-23		ABANDONO	AB	AB, SECO (Pocos datos)	jun-23	
2	CAMBEI TI	CAMBEI TI	CBT-002	1.704	11-jun-76	Ar. Cambeiti	PRODUCTOR	GL	GL, Productor con GL		

² El campo Cambeiti cuenta con un total de 11 pozos perforados, 6 pozos actualmente están en producción

3	CAMBEI TI	CAMBEI TI	CBT- 003	1.454	23-oct-76	Ar. Cambeiti / Ar DIQ3.4	PRODUCTO R	FL	FL, LC Productor Surg. Natural ICT, LL Cerrado		Doble Linea
4	CAMBEI TI	CAMBEI TI	CBT- 004	1.450	05-feb-77	Ar. Cambeiti	PRODUCTO R	GL	GL, Productor con GL		
5	CAMBEI TI	CAMBEI TI	CBT- 005	1.480	27-jun-77	Ar. Iquiri DIQ3.4	PRODUCTO R	FL	FL, Sproductor con Surgencia Natural		
6	CAMBEI TI	CAMBEI TI	CBT- 006	1.518	11-ago-77	Ar. Iquiri DIQ3.4	PRODUCTO R	FL	FL, Sproductor con Surgencia Natural		
7	CAMBEI TI	CAMBEI TI	CBT- 007	1.602	02-oct-77		ABANDON O	AB	AB, SECO	nov/107 7	
8	CAMBEI TI	CAMBEI TI	CBT- 008	1.510	28-sep-77	Ar. Cambeiti	PRODUCTO R	GL	GL, Productor con GL		
9	CAMBEI TI	CAMBEI TI	CBT- 009	1.711	29-nov-77	Ar. Cambeiti / Ar DIQ3.4	CERRADO	AH	AH, LC Ahogado, falta de Energia / AH, LL Ahogado , falta de Energia		Doble Linea
10	CAMBEI TI	CAMBEI TI	CBT- 010	1.665	23-ene-78		ABANDON O	AB	AB, SECO	abr-78	
11	CAMBEI TI	CAMBEI TI	CBT- 011	1.496	11-mar- 78	Ar. Cambeiti	CERRADO	GL	GL (Productor con GL) pozo pulmón		Doble Linea

Fuente: ANH Dirección Técnica de Exploración y Producción 2015

Del total de pozos cerrados: 3 se encuentran abandonados y 2 cerrados. A continuación, se resume el estado actual de los pozos:

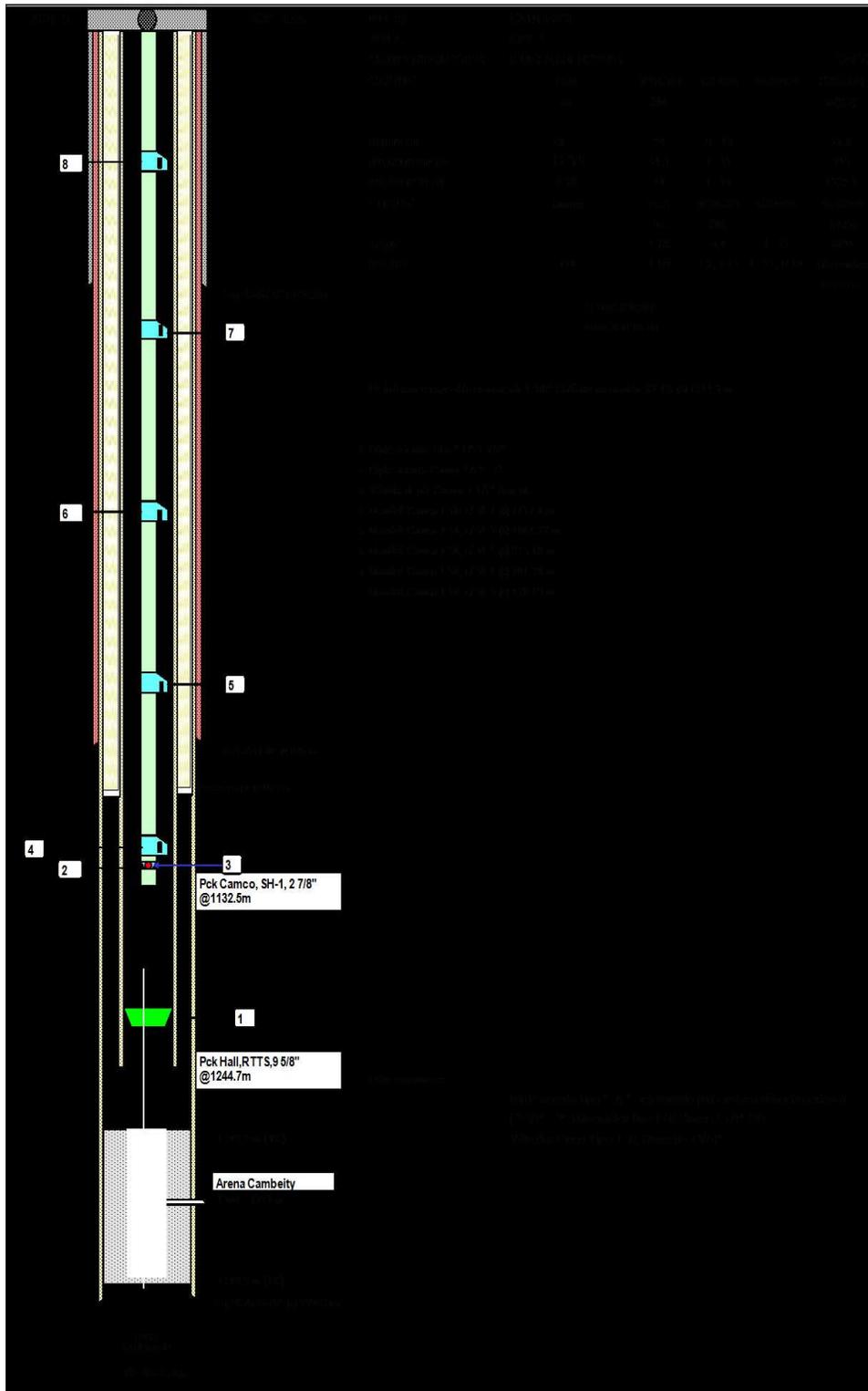
Tabla 2.2: Estado actual de los pozos en el campo Cambeiti

		PRODUCTORES	6
FL	3	ABANDONADOS	3
GL	4	ESPERANDO ABANDONO	0
IG	0	CERRADOS	2
CR Y AB	5	SIMIDEROS	0
TOTAL	12	TOTAL	11

Fuente: ANH Dirección Técnica de Exploración y Producción 2015

A continuación, se muestran las facilidades de subsuelo de los pozos en actual producción al mes de agosto de 2018:

Figura 2.7: Pozo CBT-X2 Arenisca Cambeiti



Fuente: ANH Dirección Técnica de Exploración y Producción 2018

CAPITULO 3: TEORÍA DE LA VISCOSIDAD

3.1 INTRODUCCIÓN

La mayoría de las propiedades de los fluidos no newtonianos (NN) se superponen con las de los materiales viscoelásticos, como polímeros, tejido pulmonar, sustancias similares a geles, caucho, etc. Las propiedades específicas como la memoria, el flujo y el estrés de cizallamiento no siguen la Ley de Viscosidad clásica de Newton y se ha demostrado que están bien caracterizadas por combinaciones de power-law y funciones exponenciales. Se trata de expresiones no racionales de efectos no lineales combinados en la fluencia y la tensión material que se han caracterizado bien por la función no lineal Mittag-Leffler.

En particular, representan una generalización de ecuaciones diferenciales de orden entero a ecuaciones diferenciales de orden fraccionario. Tales ecuaciones de orden generalizadas son herramientas matemáticas que emergen del cálculo fraccionario y se introducen con éxito en la ingeniería, la medicina y muchas otras áreas de aplicaciones.

El gran potencial de los modelos de impedancia de orden fraccional (FOIM) para capturar propiedades naturales de materiales en una variedad de disciplinas ha sido reconocido y establecido experimentalmente desde hace mucho tiempo. Las aplicaciones en medicina y biología son más frecuentes, ya que estos sistemas dinámicos presentan propiedades básicas como la dinámica multiescala, la difusión, la viscoelasticidad y la relajación. Las mismas propiedades se utilizan a menudo para modelar la dinámica en las áreas de geología, fabricación, industria alimentaria y productos químicos. La lista de su aplicabilidad es vasta y se resume en varias encuestas excelentes.

La prevalencia de estas propiedades aumenta mucho en fluidos No Newtonianos y materiales blandos. Como tal, se pueden identificar clases de fluidos No

Newtonianos en cada una de las áreas de aplicación antes mencionadas. Los sistemas de orden fraccionario se han aplicado recientemente en el modelado de fluidos No Newtonianos. Los autores proponen un modelo de filtración de fracción de un fluido No Newtoniano. La característica no local del fluido se ha modelado en el caso de un medio poroso³.

Un sistema fraccionario más específico, la extensión del modelo Maxwell de orden fraccionario, se ha aplicado para incorporar un proceso de relajación con el comportamiento de viscosidad No Newtoniana. La contribución principal del enfoque de sistemas de orden fraccionario se ha observado en la capacidad del cálculo de fracciones para describir el efecto de las no localidades, así como el efecto de memoria. Además, los exponentes de orden entero de las ecuaciones integro-diferenciales se pueden utilizar como parámetros de optimización adicionales en el ajuste de medición.

Un enfoque más común en el modelado y la simulación del comportamiento No Newtoniano se basa en el cálculo numérico a través de la computación dinámica de fluidos (CFD). En este caso, se utiliza software dedicado como Ansys Fluent, Open Foam, SIMSCALE, SimFlow, por mencionar sólo algunos. En este caso, se pueden encontrar aplicaciones efectivas en diferentes áreas. Se han considerado modelos de viscosidad de la sangre en flujo Newtoniano y No Newtoniano al simular el flujo en las arterias coronarias arterioscleróticas, con el fin de realizar una forma continua de medir y monitorear las propiedades del fluido de perforación, simulando un fluido No Newtoniano que se describe mejor mediante un modelo reológico de la ley de potencia de rendimiento (YPL).

Se han propuesto métodos numéricos y modelos complejos de dominio temporal utilizando modelos de leyes eléctricas y derivados fraccionarios, proporcionando

³ Los autores intentan relacionar el orden fraccionario del modelo con la dimensión fractal de la tortuosidad mediática. Una otra aplicación se puede encontrar en oleoductos, donde los autores en el caso de un flujo de tubería constante, describen, a través de modelos derivados fraccionarios, el flujo de fluido No Newtoniano impulsado por la velocidad espacialmente no local.

excelentes herramientas de análisis de simulación. La propiedad de memoria de estos fluidos también se capturó con variaciones del orden fraccionario en el tiempo. Este análisis teórico en profundidad es una base sólida y una motivación para el uso de los FOIMs.

El término FOIM fue acuñado hace algunas décadas en una aplicación de modelado de propiedades de tejidos respiratorios como el cumplimiento de los tejidos en función de los cambios anatómicos y estructurales en los trastornos respiratorios. Desde entonces se ha utilizado en muchas aplicaciones, tales como modelado de tejidos, difusión de fármacos y viscosidad de la sangre. La alta versatilidad de los FOIMs se encuentra en su combinación de integradores y diferenciadores de orden general. Las órdenes fraccionarias suelen estar limitadas entre los valores físicos que capturan propiedades definidas por la teoría clásica (newtoniana) de fluidos o materiales.

La representación de los FOIMs en el ámbito de la frecuencia simplifica en gran medida su aplicabilidad a los datos experimentales. La recopilación de datos se basa en el tiempo, pero se transforma adecuadamente en coordenadas complejas o polares equivalentes. Se aplican métodos de respuesta dinámica para obtener la reacción del material a una señal de entrada adecuadamente diseñada. Aunque hay modelos basados en el tiempo definidos para capturar propiedades de material, estos requieren una alta complejidad computacional y una cuidadosa elección de definiciones basadas en el tiempo.

Una gran ventaja de los FOIMs expresados en Laplace y sus formularios de dominio de frecuencia equivalentes es su capacidad para capturar en una forma compacta propiedades no lineales complejas y tener estos identificados en un contexto en tiempo real. Esto se mostró anteriormente en el modelado de efectos de memoria en sangre y en el diseño de un control de bucle cerrado de objetos suspendidos en un contexto variable similar a la sangre de propiedades de líquido viscoelástico.

Más allá de la aplicación específica, este Proyecto de Grado propone utilizar un marco matemático de FOIMs para capturar y vincular la estructura de parámetros del modelo con la existencia de propiedades específicas en fluidos No Newtonianos. La novedad de este enfoque consiste en la justificación del uso de FOIMs, así como el análisis sistemático de la estructura FOIM frente a las propiedades de fluidos. Novel es también el protocolo experimental diseñado y aplicado a una serie de clases de fluidos (aceite, azúcar, detergente y jabón líquido). Un elemento original adicional de esta investigación consiste en la presentación y validación de varias variaciones de FOIMs en el conjunto de datos. Por último, el conjunto de recomendaciones relativas al uso futuro de los FOIM en la captura de propiedades materiales también es novedoso.

El documento se organiza de la siguiente manera. La siguiente sección presenta las propiedades de los fluidos No Newtonianos y proporciona la motivación necesaria para el uso de FOIMs. La próxima sección proporciona una visión general de las diversas estructuras FOIM y algoritmos de identificación. La sección que la sigue, resume los resultados, la sección que viene a continuación describe una discusión y recomendaciones. El resultado principal de este trabajo se resume en la conclusión.

3.2 CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS

En esta sección, se familiarizará al lector con lo mínimo en propiedades de fluidos No Newtonianos y materiales blandos. Esta información también proporciona la motivación necesaria para el uso de FOIMs en la caracterización de tales propiedades materiales.

Considere el elemento de fluido de volumen infinitesimal hecho por la superposición de la capa de espesor infinitesimal. Si una capa muy delgada de fluido newtoniano se encuentra dentro de dos placas, como en la Figura 3.1, es posible observar la linealidad del perfil de velocidad del fluido como consecuencia de una tensión de

cizallamiento F aplicada a la placa móvil. En este contexto lineal, la fuerza externa se equilibra mediante una fuerza de fricción interna en el fluido que surge de su viscosidad. En otras palabras, el fluido se somete a una tasa de deformación uniforme $\dot{\gamma}$: la ecuación que relaciona la tensión de cizallamiento, similar a la presión, y la tasa de cizallamiento, o tasa de deformación, es:

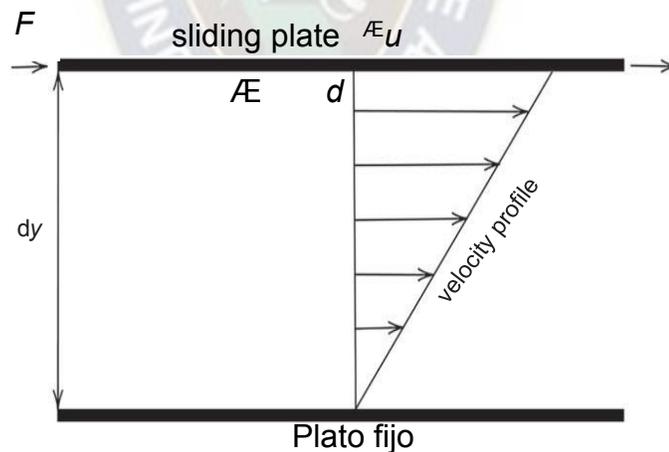
$$\tau_{yx} = -\eta\dot{\gamma}_{yx}$$

Ecuación 3.1: Ley de Fluidos de Newton⁴

también conocida como la Ley de Fluidos de Newton. El subíndice yx se utiliza para subrayar la dirección de la tensión y la tensión en el fluido.

En la siguiente imagen se logrará apreciar el Esquema de flujo Cortante unidireccional Thixotrópico.

Figura 3.1: Esquema de flujo cortante unidireccional thixotrópico.



Fuente: Basniev KS, Dmitriev NM, Chilingar GV (2012)

⁴ El signo menos en el lado derecho de esta relación sugiere que la tensión de cizallamiento es una fuerza de resistencia. Mirando la similitud con la Ley de Hook para un sólido se puede notar, con la diferencia de que nos estamos refiriendo a la tasa de acciones

Además, la relación es lineal y el coeficiente constante η se llama viscosidad del fluido. Este valor está bien determinado para una gran variedad de fluidos newtonianos, aunque puede variar con la temperatura y la presión de los fluidos, cambiando así las propiedades físicas generales del fluido. Todos los gases, así como los líquidos más comunes como el agua, los aceites, los hidrocarburos y también los metales, en forma líquida, son ejemplos de fluidos newtonianos.

Por el contrario, un fluido se llama No Newtoniano cuando no respeta la Ley de Newton. Esto significa que la relación entre la tensión de cizallamiento y la velocidad de cizallamiento ya no es lineal, es decir, la viscosidad varía en el tiempo, dependiendo de condiciones tales como condiciones de flujo, por ejemplo, geometría de flujo, tensión de cizallamiento aplicada al fluido, tasa de cizallamiento desarrollada dentro del fluido, tiempo de tensión de cizallamiento aplicado, historial cinemático de la muestra, etc.

Se puede realizar una clasificación de fluidos No Newtonianos en diferentes categorías en función del origen principal de los cambios de viscosidad, como se indica en la Figura 3.2. Sin embargo, se debe tener en cuenta que esta clasificación es bastante arbitraria, ya que la mayoría de los materiales reales a menudo muestran una combinación de dos o más propiedades. Sin embargo, en la mayoría de los casos, es posible identificar la característica No Newtoniana dominante y utilizarla como base para los cálculos de ingeniería de procesos posteriores.

3.2.1 Propiedades independientes del tiempo

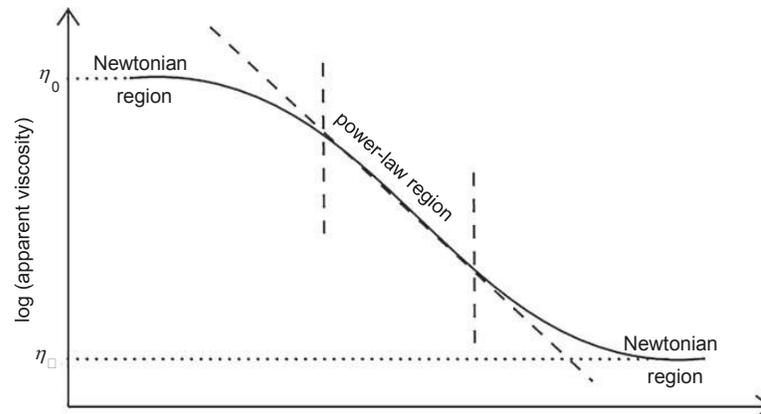
Los fluidos cuyas propiedades de flujo son independientes de la duración del cizallamiento pueden describirse como

$$\tau_{yx} = f(\gamma_{yx})$$

Ecuación 3.2: Tasa de cizallamiento

Se observará en la siguiente imagen la representación del comportamiento aparente de la viscosidad para un fluido adelgazante de cizallamiento.

Figura 3.2: Representación cualitativa del comportamiento aparente de viscosidad para un fluido adelgazante de cizallamiento.



Fuente: *Basniev KS, Dmitriev NM, Chilingar GV (2012)*

Esta ecuación implica que la tasa de cizallamiento, en cualquier punto dentro del fluido cizallado, está determinada únicamente por el valor actual de la tensión de cizallamiento en ese punto, o viceversa. Dependiendo de la forma de estos fluidos (**Ecuación 3.2**), pueden subdividirse en tres tipos diferentes:

- Líquidos con adelgazamiento de cizallamiento o pseudoplástico
- Viscopásticos, incluidos los plásticos Bingham
- Espesante o dilatante.

3.2.1.1 Líquidos pseudoplásticos o adelgazantes de cizallamiento

Una gran parte de los fluidos comúnmente conocidos pertenecen a esta familia: esmalte de uñas, crema batida, ketchup, melaza, jarabes, pulpa de papel en agua, pintura de látex, hielo, algunos aceites de silicona, arena en agua y algunos revestimientos de silicona. Estos tipos de fluidos tienen una viscosidad aparente, es decir, la relación entre la tensión de cizallamiento y la velocidad, disminuye con el

incremento de la tasa de cizallamiento. La mayoría de los fluidos pseudoplásticos son lineales por pieza y se pueden introducir las siguientes variables límite:

$$\lim_{\gamma_{yx} \rightarrow 0} \tau_{yx} = \eta_0$$

Ecuación 3.3: Viscosidad de corte cero

$$\gamma_{yx} \rightarrow 0$$

y

$$\lim_{\gamma_{yx} \rightarrow \infty} \tau_{yx} = \eta_{\infty}$$

Ecuación 3.4: Viscosidad de corte infinita

En la Figura 3.2 observamos que la región central de la curva es lineal por piezas. Teniendo en cuenta que la trama está en escala logarítmica, este comportamiento puede modelarse bien como una relación poder-ley

$$\tau_{yx} = (\gamma_{yx})^n$$

Ecuación 3.5: Relación poder-ley

o usando la Ecuación 3.2 incorporada en la Ecuación 3.5 y resolviendo con respecto a la viscosidad que se obtiene:

$$\eta = m(\gamma_{yx})^{n-1}$$

Ecuación 3.6: Modelo Ostwald-De Waele

que también se conoce como el modelo Ostwald-De Waele para el líquido pseudoplástico. Los dos parámetros del modelo n y m se denominan, respectivamente, el índice de la ley de potencia y el coeficiente de consistencia del fluido. Para un fluido newtoniano $n = 1$, mientras que para una sustancia pseudoplástica $n < 1$. Cuanto menor sea el valor del índice de la ley de potencia, mayor será el grado de adelgazamiento de la cizalladura.

Ciertamente que también se conoce como el modelo Ostwald-De Waele para el líquido pseudoplástico. La Ecuación 3.6 proporciona la descripción más simple del comportamiento de adelgazamiento de cizallamiento, pero también tiene una serie de limitaciones. Otro modelo se basa en la suposición de que el comportamiento de adelgazamiento de cizallamiento es causado por la formación y descomposición de «vínculos o unidades estructurales», también observados en polímeros y tejidos pulmonares. Para el cizallamiento constante unidimensional, se tiene:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (\lambda \dot{\gamma}_{yx})^{2/3}}$$

Ecuación 3.7: Ajuste para la tasa de cizallamiento

donde las η_0 y η_{∞} , respectivamente, son las viscosidades de cizallamiento cero e infinita, mientras que la constante es una constante con unidades de tiempo. Esta fórmula se informó para ajustar satisfactoriamente los datos de la tasa de cizallamiento de corte para una amplia variedad de sistemas pseudoplásticos. Además, este modelo es la clara evidencia de cómo la teoría de los sistemas de orden fraccionado puede ser más adecuada para reproducir este tipo de comportamiento, en lugar de aproximación de orden entero.

3.2.1.2 Fluidos Visco-plásticos

Esta clase de materiales se caracteriza por la existencia de una tensión de rendimiento mínima τ_0 que debe superarse antes de que se produzca la deformación

(o flujo). Se puede explicar este comportamiento postulando que la sustancia en reposo consiste en una estructura tridimensional de suficiente rigidez o resistencia para resistir cualquier estrés externo menor que 0. Para niveles de tensión mayores que 0, la estructura se afloja, y el material se comporta como un fluido viscoso. Un fluido con una curva de flujo lineal para $|\gamma_{yx}| > 0$ se llama fluido plástico Bingham y se caracteriza por un valor constante de viscosidad plástica. Entre las muchas ecuaciones matemáticas para modelar este tipo de comportamiento de flujo, la más simple y tal vez la más utilizada se puede escribir como:

$$\tau_{yx} = \tau_0^B + \eta \gamma_{yx} \quad \text{si } \tau_{yx} > \tau_0^B$$

y

$$\gamma_{yx} = 0 \quad \text{si } \tau_{yx} \leq \tau_0^B$$

Ecuación 3.8: Comportamiento del fluido plástico Bingham

Donde τ_0^B es el límite elástico y $\eta \gamma_{yx}$ es el plástico.

Otro modelo para fluidos viscoplásticos se conoce como el modelo Herschel-Bulkley, escrito para un flujo de cizallamiento simple como

$$\tau_{yx} = \tau_0^B + m(\gamma_{yx}) \quad \text{si } \tau_{yx} > \tau_0^B$$

y

$$\gamma_{yx} = 0 \quad \text{si } \tau_{yx} \leq \tau_0^B$$

Ecuación 3.9: Modelo Herschel-Bulkley

Esta fórmula puede ser vista como una generalización del modelo simple de Bingham (Ecuación 3.8), en el que la dependencia de la tasa de cizallamiento lineal ha sido reemplazada por un comportamiento de la ley de potencia. Este modelo se utiliza ampliamente para modelar la viscosidad de la sangre y las aplicaciones de modelado de arcilla fangosa.

3.2.1.3. Líquidos dilatantes o espesantes de cizallamiento.

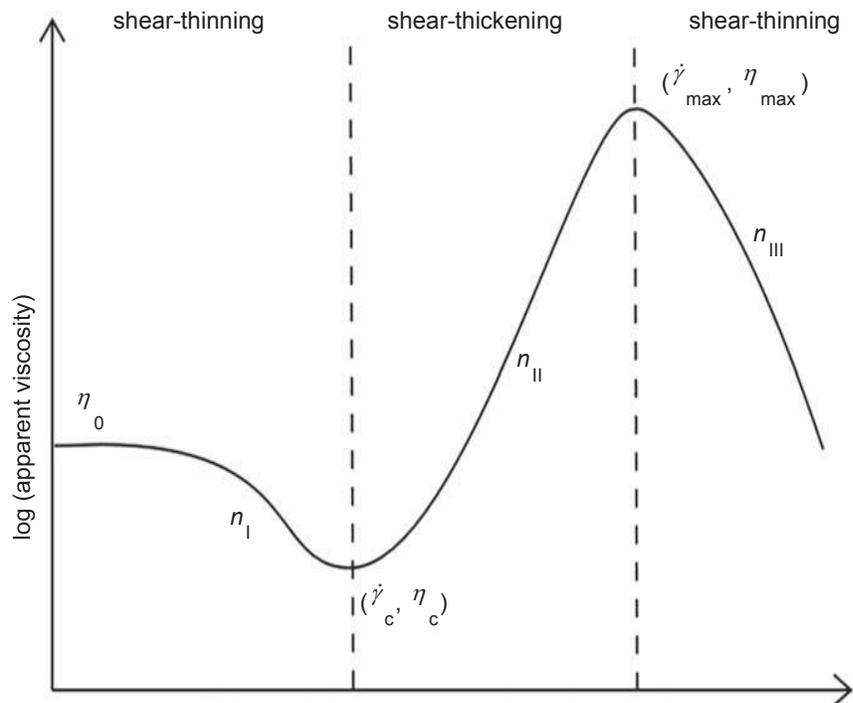
Estos materiales, también conocidos como materiales dilatantes, son similares a los materiales adelgazantes de cizallamiento en que no muestran tensión de rendimiento, pero su viscosidad aparente aumenta con el aumento de la tasa de cizallamiento. Este tipo de comportamiento se encuentra en suspensiones concentradas de sólidos, y se puede explicar cualitativamente de la siguiente manera: Cuando una suspensión está en reposo, el espacio entre una partícula y otra es el mínimo y el líquido presente es suficiente para llenar los espacios vacíos. A bajas tasas de cizallamiento, el líquido lubrica el movimiento de una partícula más allá de otra, y las tensiones resultantes son, por lo tanto, bajas.

A altas tasas de cizallamiento, por otro lado, el embalaje denso de sólidos se descompone y el material se expande o dilata ligeramente causando un aumento en la brecha, y por lo tanto la cantidad de líquido disponible ya no es suficiente para lubricar el movimiento sólido de una partícula más allá de otra y la fricción sólido-sólido resultante hace que las tensiones aumenten rápidamente, que, a su vez, provoca un aumento de la viscosidad aparente. A bajas tasas de cizallamiento, el líquido lubrica el movimiento de una partícula más allá de otra, y las tensiones resultantes son, por lo tanto, bajas. A altas tasas de cizallamiento, por otro lado, el embalaje denso de sólidos se descompone y el material se expande o dilata ligeramente causando un aumento en la brecha, y por lo tanto la cantidad de líquido disponible ya no es suficiente para lubricar el movimiento sólido de una partícula más allá de otra y la fricción sólido-sólido resultante hace que las tensiones aumenten rápidamente, que, a su vez, provoca un aumento de la viscosidad aparente.

A bajas tasas de cizallamiento, el líquido lubrica el movimiento de una partícula más allá de otra, y las tensiones resultantes son, por lo tanto, bajas. A altas tasas de cizallamiento, por otro lado, el embalaje denso de sólidos se descompone y el material se expande o dilata ligeramente causando un aumento en la brecha, y por

lo tanto la cantidad de líquido disponible ya no es suficiente para lubricar el movimiento sólido de una partícula más allá de otra y la fricción sólido-sólido resultante hace que las tensiones aumenten rápidamente, que, a su vez, provoca un aumento de la viscosidad aparente⁵.

Figura 3.3: Curva de viscosidad cualitativa para un fluido de engrosamiento cizallamiento



Fuente: Basniev KS, Dmitriev NM, Chilingar GV (2012)

El comportamiento completo de los fluidos típicos de engrosamiento de cizallamiento, como se indica en la Figura 3.4, da evidencia de tres zonas distintas, dos de ellas, para una tasa de cizallamiento muy baja y muy alta, respectivamente, son regiones en las que el fluido muestra características de adelgazamiento, es decir, la viscosidad disminuye con el aumento de las tasas de cizallamiento. Sin

⁵ En las últimas décadas, los datos experimentales sugieren que las curvas aparentes de la viscosidad y la tasa de cizallamiento a menudo dan lugar a un comportamiento lineal en las coordenadas del registro sobre un rango de interés de tasa de cizallamiento limitado, y por lo tanto el modelo de la ley de potencia (Ecuación 3.5) puede utilizarse con $n > 1$ en este caso.

embargo, para la velocidad de cizallamiento de rango medio, el líquido se comporta como el engrosamiento de cizallamiento.

Esta región es lineal en la gráfica log-log, como se mencionó anteriormente. El modelo se ha revisado teniendo en cuenta las tres regiones diferentes:

$$\eta \begin{cases} \eta_c + \frac{\eta_0 - \eta_c}{1 + \left[K_I \left(\frac{\dot{\gamma}^2}{\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_c} \right) \right]^{\eta_I}} & \text{para } \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c \\ \eta_{max} + \frac{\eta_c - \eta_{max}}{1 + \left[K_{II} \left(\frac{\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_c}{\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_{max}} \right) \right]^{\eta_{II}}} & \text{para } \dot{\gamma}_c < \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_{max} \\ \frac{\eta_{max}}{1 + [K_{III}(\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_{max})]^{\eta_{III}}} & \text{para } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_{max} \end{cases}$$

Ecuación 3.10: Modelo para la curva de viscosidad de líquidos dilatantes

Cabe señalar que las tres ramas de la Ecuación 3.10 tienen una forma funcional basada en la del modelo Cross: la similitud se puede encontrar si la Ecuación 3.7 se reorganiza resolviendo con respecto a η . Por lo tanto, los parámetros que aparecen en la Ecuación 3.10 tienen las mismas dimensiones e interpretación: K_I , K_{II} , K_{III} poseen dimensión de tiempo y son responsables de las transiciones entre las mesetas y la ley de potencia, mientras que los exponentes sin dimensiones ni están relacionados con las pendientes de los regímenes de la ley de potencia. Además, es suficiente calcular el límite derecho e izquierdo de las tres ramas para ver que la función es continua.

3.2.2. Propiedades dependientes del tiempo

Para muchos materiales industriales, así como algunos materiales alimentarios comunes, la viscosidad depende tanto de la velocidad de cizallamiento como del tiempo de cizallamiento. El ejemplo más común es la miel: cuando se corta a una velocidad constante de cizallamiento, después de un período de descanso, su

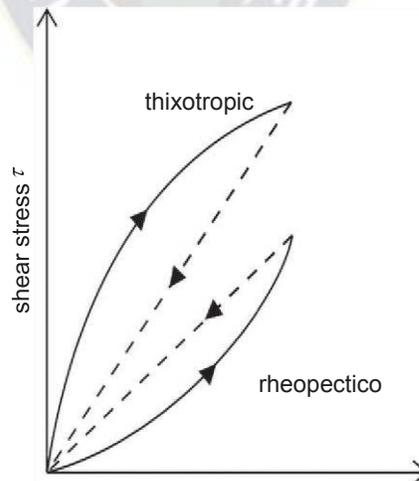
viscosidad aparente disminuye gradualmente a medida que su "estructura" interna se descompone progresivamente.

3.2.2.1. Fluidos tixotrópicos

Se dice que un material exhibe tixotropía si su viscosidad aparente (o estrés de cizallamiento) disminuye con el tiempo cuando se corta a una tasa constante de cizallamiento. Si la curva de flujo se mide en un solo experimento en el que la tasa de cizallamiento se incrementa constantemente a una velocidad constante de cero a un valor máximo, y luego se reduce a la misma velocidad a cero de nuevo, se obtiene un bucle de histéresis, como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.5. La altura, la forma y el área cerrada del bucle dependen del esfuerzo de cizalla.

A continuación, se verá el comportamiento cualitativo de la tasa de cizallamiento de cortica para materiales tixotrópicos y reopecticos:

Figura 3.4: Comportamiento cualitativo de la tasa de cizallamiento de cortica para materiales tixotrópicos y reopecticos



Fuente: Basniev KS, Dmitriev NM, Chilingar GV (2012)

En la *Figura 3.4* se muestran parámetros como la duración y la velocidad de cizallamiento, el historial de deformación pasado de la muestra de material, etc.

En la práctica, las sustancias tixotrópicas muestran propiedades muy similares a los fluidos adelgazantes con la diferencia de que las primeras no muestran viscosidad constante si se mantiene una tasa de cizallamiento de valor fijo durante un tiempo.

Ejemplos comunes son yogur, mantequilla de maní, miel, geles de óxido de hierro acuoso, geles de gelatina, suspensión negra de carbono en caucho de neumáticos fundidos, algunos lodos de perforación, muchas pinturas, muchas suspensiones coloidales.

3.2.2.2. Fluidos reopecticos

Los relativamente pocos sistemas para los que aumenta la viscosidad aparente con la duración del cizallamiento se dicen que muestran la reopexia, o tixotropía negativa. De nuevo se observan efectos de histéresis en la curva de flujo, pero en este caso se invierte en comparación con el material tixotrópico. Por analogía con la tixotropía, la reopexía se asocia con una acumulación gradual de 'estructura' a medida que el fluido es cizallado, aunque no es seguro si se alcanzará un equilibrio. Por lo tanto, en un material reopectico, la estructura se acumula por cizallamiento y se descompone cuando el material está en reposo. Por esta razón, se puede asociar con el engrosamiento de cizallamiento, o líquidos dilatantes.

Algunos ejemplos de fluidos reopecticos son el líquido sinovial, la tinta de la impresora, la pasta de yeso. Para concluir, hemos observado que las propiedades del material pueden cambiar en función de varias condiciones dinámicas, que requieren varias estructuras de modelo individuales. La ley de potencia, la exponencial y sus combinaciones se muestran comúnmente como dinámicas que naturalmente requieren modelos generalizados como modelos de orden fraccionario. Aunque existe una representación del modelo de fraccionamiento de dominio de tiempo, este proyecto de grado tratará sobre los FOIM representados en el dominio de Laplace para la identificación de dominio de frecuencia.

En este proyecto de grado se presenta el modelo, los métodos numéricos, los algoritmos y la implementación paralela de un simulador de depósito térmico que diseñado para simulaciones numéricas de depósito térmico con múltiples componentes en dominio tridimensional utilizando computadoras paralelas de memoria distribuida. Su modelo matemático completo se introduce con correlaciones para propiedades importantes y modelado de pozos.

Varias restricciones de pozo, tales como presión de agujero inferior fijo, petróleo fijo, agua, gas y líquidos en condición de la superficie y condición del depósito, modelo de transferencia de calor constante, modelo de transferencia de calor convectivo, modelo de calentador (control de temperatura, control de velocidad, control de velocidad/temperatura dual), y el subcool (trampa de vapor), se introducen en detalle, incluyendo sus modelos matemáticos y métodos. Se presentan métodos numéricos eficientes (esquema de discretización, métodos de desacoplamiento de matrices y precondicionamientos), tecnologías de computación paralela y detalles de implementación, incluido el análisis de opciones, el análisis de palabras clave, la E/S paralela (entrada y salida), la gestión de datos y la visualización. El simulador está diseñado para modelos gigantes con miles de millones o incluso billones de bloques de rejilla utilizando cientos de miles de CPU. Los experimentos numéricos muestran que nuestros resultados coinciden con simuladores comerciales, lo que confirma la exactitud de nuestros métodos e implementaciones. La simulación SAGD con 15106 pares de pozos también se presenta para estudiar la eficacia de nuestros métodos numéricos. Las pruebas de escalabilidad demuestran que nuestro simulador puede manejar modelos gigantes con 216 mil millones de bloques de cuadrícula usando 100.800 núcleos de CPU y el simulador tiene una buena escalabilidad.

3.3. MODELO DE SIMULACIÓN

La mayoría de los simuladores comparten el mismo marco teórico. Se hicieron los siguientes supuestos: el componente de agua existe en las fases de agua y gas,

todos los componentes de petróleo existen en las fases de petróleo y gas, los componentes de gas no condensables existen únicamente en la fase de gas y las tres fases coexisten durante toda la simulación, los componentes de petróleo pesado existen sólo en la fase de petróleo, existen componentes de petróleo ligero en las fases de petróleo y gas.

Dependiendo de la entrada, se permiten componentes de petróleo arbitrarios y componentes de gas no condensables. Se han realizado los cambios necesarios para abordar la diferencia entre el modelo de combustión in situ y el modelo térmico.

3.4.1. La Ley de Darcy

La ley de Darcy se aplica para modelar la velocidad de una fase fluida, que describe la relación entre la permeabilidad, viscosidad, saturación y diferencia de presión. En nuestro modelo térmico, coexisten la fase del agua (w), la fase de petróleo (o) y la fase gaseosa (g).

$$q = kA \frac{\Delta p}{\mu L}$$

Ecuación 3.11: Ley de Darcy

3.4.2. Ecuaciones de conservación de masas

Para un sistema multifásico y multicomponente, $x_{c,\alpha}$ denota la fracción molar de un componente en la fase de α . El número de moles de un componente en una fase y el número molar total de la fase se indican como $n_{c,\alpha}$ y n_α , respectivamente. Por lo tanto, las fracciones:

$$x_{c,\alpha} = \frac{n_{c,\alpha}}{n_\alpha}$$

Ecuación 3.12: Fracción molar

En el modelo térmico más simple, la fase del agua tiene sólo un componente de agua, por lo que el n_w es 1. Si la fase de gas existe, puede contener agua, petróleo ligero y componentes de gas no condensables. Dado que cada componente puede existir en varias fases, el número total de moles del componente c se escribe de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \sum_{\alpha}^{N_{\alpha}} \rho_{\alpha} S_{\alpha} x_{c,\alpha} \right) = -\nabla \cdot \left(\sum_{\alpha}^{N_{\alpha}} \rho_{\alpha} S_{\alpha} \bar{\mu}_{\alpha} \right) + \sum_{\alpha}^{N_{\alpha}} q_{\alpha,well} x_{c,\alpha}$$

Ecuación 3.13: Modelo matemático para el número de moles

En esta ecuación, es notable la diferencia con otros modelos, la masa conservada aquí es sólo el número molar en lugar de la masa. Además, son la densidad de moles y la producción/inyección de moles de la fase α .

3.4.3. Ecuación de conservación de energía

La ecuación de conservación de energía para un proceso térmico se describe como:

$$\begin{aligned} \partial t (\phi (\rho_w S_w U_w + \rho_o S_o U_o + \rho_g S_g U_g) + (1 - \phi) U_r) \\ = \nabla \cdot (K_t \nabla T) - \nabla \cdot (\rho_w H_w u_w + \rho_o H_o u_o + \rho_g H_g u_g) \\ + (q_{w,well} H_w + q_{o,well} H_o + q_{g,well} H_g) - Q_{loss} \end{aligned}$$

Ecuación 3.14: Conservación de la energía

donde U denota la energía interna volumétrica. En el lado derecho, el primer término representa el término de conducción. La conductividad térmica aquí es una combinación de líquido, y roca, donde se aplica una regla de mezcla lineal⁶:

⁶ Esto es causado por una diferencia de temperatura, donde la tasa de conducción es restringida por K_T , la conductividad térmica a granel.

$$K_T = \varphi[S_w K_w + S_o K_o + S_g K_g] + (1 - \varphi)K_r$$

Ecuación 3.15: Conductividad térmica

En la ecuación, K_w , K_o , K_g , K_r denotan conductividades térmicas para la fase de agua, fase de petróleo, fase de gas y roca por separado. Esta regla también se denomina regla de mezcla simple en CMG STARS. La regla compleja de mezcla también se implementa en el simulador, cuyos detalles se pueden leer del manual CMG STARS. Debemos mencionar que hay diferentes maneras de modelar la energía interna de la roca: $(1 - \varphi)$. En la ecuación anterior, la porosidad, φ , es una función de presión y temperatura, por lo que la energía interna de la roca es una función de presión y temperatura. Este método supone que el volumen de un bloque de cuadrícula no cambia. Otra forma es asumir que el volumen de la roca no cambia. No cambia durante la simulación y este método preserva la energía rocosa. El segundo método se aplica como el método predeterminado en CMG STARS y nuestro simulador. También se considera un término de pérdida de calor para subutilizar y sobrecargar, y se aplica el método semi-análisis desarrollado por Vinsome et al.

3.4.4. Presión capilar

Presión capilar P_c es la diferencia de presión a través de la interfaz entre dos fluidos inmiscibles que surgen de las fuerzas capilares, que suelen ser funciones de saturación, según la relación:

$$p_w = p_o - p_{cow}(S_w)$$

$$p_g = p_o - p_{cog}(S_g)$$

Ecuación 3.16: Presión capilar

La fase de gas puede aparecer y desaparecer. El método PER (Pseudo-Equilibrium Ratios) se aplica para calcular los valores K de los componentes de agua y de petróleo ligero, de forma que la fase del agua y la fase de petróleo no desaparezcan.

Sin embargo, la saturación de agua y la saturación de petróleo debe manejarse cuidadosamente cuando son demasiado pequeñas y la fase de gas existe. Los derivados parciales de los valores K a las saturaciones deben incluirse cuando las saturaciones son pequeñas.

3.4.5. Restricciones de composición de fase

Una restricción implica que la suma de las fracciones molares de todos los componentes en una fase suman 1, que normalmente se encuentra para un flujo composicional:

$$\sum_{\alpha}^{N_{\alpha}} x_{c,\alpha} = 1$$
$$\alpha = w, o, g$$

Ecuación 3.17: Fracción molar

Proviene del número total de moles de una fase dado que

$$\sum_{\alpha}^{N_{\alpha}} n_{c,\alpha} = n_{\alpha}$$
$$\alpha = w, o, g$$

Ecuación 3.18: Número de moles totales

3.4.6. Restricciones de equilibrio de fase

En un sistema multi-componente, un valor K (o una relación de equilibrio) se define como la relación de las fracciones molares de un componente en sus dos fases distribuidas:

$$K_{c,\alpha_1,\alpha_2} = \frac{x_{c,\alpha_1}}{x_{c,\alpha_2}}$$

Ecuación 3.19: Relación de equilibrio

En el modelo, un valor K es una función de presión y temperatura, que se calcula a partir de una ecuación analítica como:

$$K = \left(\frac{kv_1}{p} + kv_2p + kv_3 \right) e^{\left(\frac{kv_4}{T - kv_5} \right)}$$

Ecuación 3.20: Equilibrio en función de la presión y temperatura

Cuando existe la fase del gas, los cálculos de los valores K para el agua, el petróleo ligero y el petróleo pesado son los siguientes:

$$K_w = K_w(p, T) = \left(\frac{kv_{1w}}{p} + kv_{2w} + kv_{3w} \right) e^{\left(\frac{kv_{4w}}{T - kv_{5w}} \right)}$$

$$K_{o,i} = K_{o,i}(p, T) = \left(\frac{kv_{1o,i}}{p} + kv_{2o,i} + kv_{3o,i} \right) e^{\left(\frac{kv_{4o,i}}{T - kv_{5o,i}} \right)}$$

Ecuación 3.21: Equilibrio para el agua y el petróleo

El KV_1 , KV_4 y KV_5 de CMG STARS son $1.1705e5$ atm, -3816.44 y -227.02 C. En el modelo térmico, se modifican los cálculos de los valores K, donde se aplica el método PER (Pseudo-Equilibrium Ratios) para el agua y el petróleo ligero,

$$K_w = K_w^*(p, T) = \left(\frac{S_w}{S_w + n_{c,g}} \right) K_w(p, t)$$

$$K_{o,i} = K_{o,i}^*(p, T) = \left(\frac{S_o}{S_o + \epsilon} \right) K_{o,i}(p, t)$$

Ecuación 3.22: Equilibrios en función de pseudo-equilibrios

En los cálculos de pseudo valores K, ϕ es un pequeño número del orden de $1e$ a 4 . La fase del agua y la fase de petróleo existen a través de la simulación de entrada. Sin embargo, se permite que la fase gaseosa desaparezca. La fracción molar de la fase de gas para los componentes de petróleo y componente de agua son funciones de p , T , S_w , S_g . La fracción molar en la fase de gas para los componentes de gas son las incógnitas básicas:

$$y = y(p, T, S_w, S_g)$$

3.3 MODELO VISCOPLÁSTICO DE FLUJO

Los datos a utilizar permiten justificar el modelo analítico del flujo pseudo-estacionario de condensado visco-plástico no lineal al pozo vertical con un área de drenaje de configuración aleatoria.

Este modelo es un sistema de ecuaciones, que generalmente describe el proceso del flujo de condensado, mostrando las propiedades del fluido viscoslástico no lineal dependiendo de la reducción de presión DP (Olkhovskaya 2011):

$$Q = \begin{cases} \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{B_n \mu_o \left(\ln \frac{R_k}{R_c} + \omega \right)}, & \Delta P \geq \Delta P_n \\ \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{B_n \left(\mu_m \ln \frac{r_m}{R_c} + \frac{\Delta H \mu_o + \Delta \mu H_r}{\Delta H} \ln \frac{\frac{\Delta \mu}{\Delta H} + \frac{\mu_o}{H_r}}{\frac{\Delta \mu}{\Delta H} + \frac{\mu_m}{H_m}} + \mu_o \left(\ln \frac{R_k}{R_c} + \omega \right) \right)}, & \Delta P_n \leq \Delta P \leq \Delta P_m \\ \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{B_n \mu_m \left(\ln \frac{R_k}{R_c} + \omega \right)}, & \Delta P \leq \Delta P_m \end{cases}$$

Ecuación 3.23: Modelo matemático visco-plástico no lineal

Dependiendo del gradiente de presión y las peculiaridades de la reestructuración del sistema de petróleo. Los valores de los gradientes de presión críticos y las variaciones de viscosidad definidas en los experimentos de flujo que simulan el flujo de petróleo para las condiciones iniciales de la capa del campo Cambeiti se muestran en la Tabla 4.1.

El proceso de modelado hidrodinámico puede utilizar tanto los datos del experimento de flujo como generalizados en la Ecuación 3.23 donde ΔP_m es la reducción mínima de presión, bajo la cual el petróleo en toda el área de drenaje del pozo se filtrará a una viscosidad mínima constante l_m y con estructura interna completamente destruida; ΔP_n es la reducción máxima de presión bajo la cual el petróleo en toda el área de drenaje del pozo fluirá a una viscosidad máxima constante y con una estructura interna inalterada.

A continuación, veremos el análisis de los estudios reológicos y de flujo del petróleo del área del campo CAMBEITI temperatura inicial del embalse en base a la viscosidad y gradiente crítico.

Tabla 3.1: Análisis de los estudios reológicos y de flujo del petróleo del área del campo CAMBEITI temperatura inicial del embalse

Parámetro de Viscosidad	Valor	Gradiente crítico presión(Pa/m)	
Maximum oil viscosity l_0 (mPa s)	1085.7	Structure shift H_r	2800.8
Effective oil viscosity l_{ef} (mPa s)	732.1		
Minimum oil viscosity l_m (mPa s)	400.7	Structure destruction H_m	4149.3
Index of viscosity anomaly	2.71		

Fuente: Programa de Trabajo y Presupuesto REPSOL 2015

El parámetro ω depende del factor de forma C_A , calculado por Dietz (1965) y recalculado

$$\omega = \ln \left(\sqrt{\frac{2.2458\pi}{C_A}} \right)$$

Ecuación 3.24: Parámetro ω

Otros símbolos en Ecuación 3.23: Q : velocidad de flujo de pozo; k : permeabilidad absoluta; h : espesor del reservorio productivo; P_k : la presión sobre el límite externo del área de flujo; P_c : presión del agujero inferior en el pozo; R_k : la distancia desde la parte inferior del agujero hasta el límite externo del área de flujo; R_c : el radio del pozo; H_r y H_m : dos gradientes de presión críticos, $\Delta H - H_m - H_r$; r_m : la distancia desde el pozo hasta el límite, donde el gradiente de presión es H_m ; r_d : la distancia desde el pozo hasta el límite, donde el gradiente de presión es igual a H_r ; B_n : factor de volumen de petróleo.

El significado físico de Ecuación 3.23 es el siguiente. El flujo de petróleo al pozo se produce con viscosidad variable, dependiendo del gradiente de presión. En el área más cercana al pozo, que se puede esquematizar como un círculo equivalente en tamaño y caracterizado por el radio r_m , el petróleo fluye con estructura interna completamente destruida y viscosidad mínima constante l_m . Al alejarse del pozo y la reducción del gradiente de presión, la estructura del petróleo se vuelve más fuerte y su viscosidad aumenta. Fuera del área circular esquemática con radio r_d , la viscosidad del petróleo alcanza su valor máximo l_0 .

Si en toda el área de flujo el gradiente de presión supera el segundo gradiente de presión crítica (el gradiente de destrucción de estructura completa) H_m , el petróleo va a filtrar con una viscosidad mínima l_m , ya que la estructura formada por los asfaltos y resinas, se destruye. De hecho, este efecto se puede lograr mediante el aumento de la presión o la temperatura. En el primer caso, significa la expansión de

la zona donde el petróleo se filtra con una viscosidad mínima; en el segundo caso, significa la reducción de los gradientes de presión críticos, que se demuestra experimentalmente y se refleja matemáticamente en las dependencias de correlación. Los radios equivalentes están relacionados con el caudal de pozo con las siguientes relaciones (Devlikamov et al. 1975):

$$r_m = \frac{Q\mu_m}{2\pi khH_m}$$

Ecuación 3.25: Radio equivalente donde el gradiente de presión es H_m

$$r_d = \frac{Q\mu_o}{2\pi khH_r}$$

Ecuación 3.26: Radio equivalente donde el gradiente de presión es H_r

El flujo de petróleo Q , caracterizado por la viscosidad constante l , teniendo en cuenta el impacto del límite externo de la forma aleatoria en el flujo dentro del área A , se describe mediante la ecuación (Olkhovskaya 2011):

$$Q = \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{B_n \mu \ln \left[\sqrt{2.2458A} / (C_A R_c^2) \right]}$$

Ecuación 3.27: Caudal

Expresando el caudal Q de la Ecuación 3.26: Radio equivalente donde el gradiente de presión es H_r

y Ecuación 3.27 y equiparándolo al lado derecho de la Ecuación 3.27 donde se sustituye la viscosidad adecuada, ajustando la

Ecuación 3.24, se puede obtener la ecuación para el cálculo de presiones ΔP_m ΔP_n .

$$\Delta P_m = H_m R_k B_n \left(\ln \frac{R_k}{R_c} + \omega \right)$$

$$\Delta P_n = H_r R_k B_n \left(\ln \frac{R_k}{R_c} + \omega \right)$$

Ecuación 3.28: Variaciones de presión

Si los valores calculados ΔP_m y ΔP_n son mayores que la presión en el límite externo del área de flujo P_k , entonces bajo las propiedades geológicas y físicas existentes del colector y la condición termobárica del depósito en el área del pozo estudiado, la energía del depósito no será suficiente para superar el primer gradiente de presión crítica (el gradiente de la estructura inicial) H_r . La influencia de las propiedades estructurales y mecánicas del petróleo en el flujo será suficiente para superar el primer gradiente de presión crítico (el gradiente de la estructura inicial) H_r . La influencia de las propiedades estructurales y mecánicas del petróleo en el flujo será suficiente para superar el primer gradiente de presión crítico (el gradiente de la estructura inicial) H_r . Maximizada.

Si el valor ΔP_n calculado es menor y el valor de ΔP_m es mayor que la presión en el límite externo del área de flujo P_k , la energía del depósito será suficiente sólo para superar el primer gradiente de presión crítica H_r . Pero no se alcanzará el segundo gradiente de presión crítico H_m^7 .

Si los valores calculados ΔP_m y ΔP_n son inferiores a la presión en el P_k , la energía del depósito será suficiente para superar tanto el primero como el segundo gradientes de presión críticos. La influencia de las propiedades estructurales y mecánicas del petróleo en el flujo será mínima. Modelo (5) es una modificación de la ecuación analítica del flujo constante de petróleo viscoplástico no lineal a un pozo vertical; fue derivado por primera vez por los autores (Devlikamov et al. 1975). Se obtuvo a través de una combinación directa similar a la ecuación de equilibrio de material macroscópico generalizada (Dake 2001). Su diferencia es la importancia de la forma geométrica del límite externo del área de flujo y el área de drenaje en el proceso de flujo, así como el carácter pseudo-estacionario del flujo de petróleo viscoplástico no lineal al pozo en el sistema "reservoir-well bottom zone".

⁷ En consecuencia, la influencia de las propiedades estructurales y mecánicas del petróleo en el flujo se debilitará, pero no se eliminará por completo.

El sistema de la Ecuación 3.23 puede resolver los siguientes problemas en el modelado del desarrollo de campos petrolíferos de alta viscosidad: determinar los parámetros termobáricos de producción, bajo los cuales se eliminará la influencia de las propiedades no newtonianas del petróleo en el proceso de flujo



CAPITULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA

4.1 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LA VISCOPLATICIDAD

4.1.1 Parámetro w

Se utiliza la siguiente relación:

$$\omega = \ln \left(\sqrt{\frac{2.2458\pi}{C_A}} \right)$$

El área del ducto es de 6 pulgadas, reemplazando:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} \left(6 * \frac{1}{12} \right)^2$$

$$A = 0.1963 \text{ ft}^2$$

Para el coeficiente de descarga:

$$C_A = 0.9 * A = 0.1 * 0.1963$$

$$C_A = 0.0196 \text{ ft}^2$$

Luego:

$$\omega = \ln \left(\sqrt{\frac{2.2458\pi}{0.0196}} \right)$$

$$\omega = 2.943$$

4.1.2 Radio equivalente donde el gradiente de presión es H_m

Se utiliza la siguiente relación:

$$r_m = \frac{Q\mu_m}{2\pi khH_m}$$

Reemplazando:

$$r_m = \frac{65 \text{ BPD} * 0.55}{2\pi * 0.1 * 10 * 1200} \frac{5.614 \text{ ft}^3}{1 \text{ bbl}}$$

$$r_m = 0.0266 \text{ ft}$$

El radio de extensión viscoplástica de la parafina es de 0.0266 ft

4.1.3 Radio equivalente donde el gradiente de presión

Se utiliza la siguiente relación:

$$r_d = \frac{Q\mu_o}{2\pi khH_r}$$

Reemplazando:

$$r_d = \frac{65 \text{ BPD} * 0.40}{2\pi * 0.1 * 10 * 1200} \frac{5.614 \text{ ft}^3}{1 \text{ bbl}}$$

$$r_d = 0.0196 \text{ ft}$$

4.1.4 Caudal estándar sin parafina:

Se utiliza la siguiente relación:

$$Q = \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{B_n \mu \ln \left[\sqrt{2.2458A / (C_A R_c^2)} \right]}$$

Reemplazando:

$$Q = \frac{2\pi * 0.1 * 10 * (2500 - 1900)}{2 * \mu \ln \left[\sqrt{2.2458 * 0.1963 * / (0.0196 * 0.0196^2)} \right]}$$
$$Q = \frac{2\pi * 0.1 * 10 * (2500 - 1900)}{2 * 0.55 * \ln \left[\sqrt{2.2458 * 0.1963 * / (0.0196 * 0.0266^2)} \right]} * \frac{1 \text{ bbl}}{5.614 \text{ ft}^3}$$

$$Q_{rec} = 117.77 \text{ Bbl}$$

4.1.5 Variaciones de presión

Se utiliza las siguientes relaciones:

$$\Delta P_m = H_m R_k B_n \left(\ln \frac{R_k}{R_c} + \omega \right)$$

$$\Delta P_n = H_r R_k B_n \left(\ln \frac{R_k}{R_c} + \omega \right)$$

Reemplazando:

$$\Delta P_m = 1500 * 0.0216 * 2 \left(\ln \frac{0.0216}{3} + 2.943 \right)$$

$$\Delta P_n = 10 * 0.0116 * 2 \left(\ln \frac{0.0216}{3} + 2.943 \right)$$

$$\Delta P_m = -128.99 \text{ Psi}$$

$$\Delta P_n = -0.85 \text{ Psi}$$

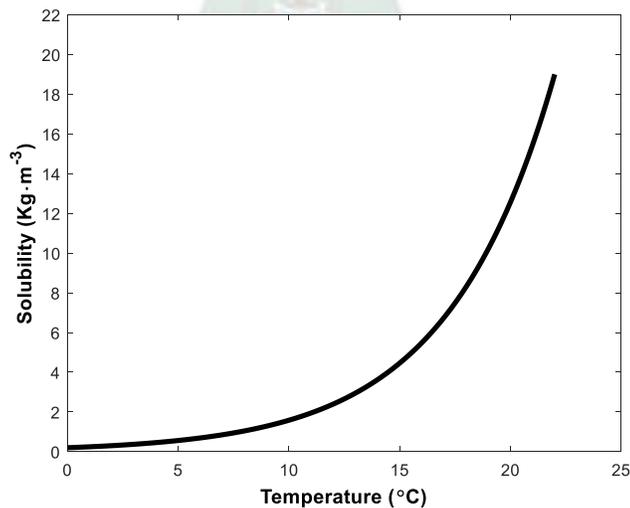
4.1.6 Cálculo del caudal a través del modelo VISCOPLÁSTICO no lineal

Se utiliza la siguiente relación:

$$Q = \begin{cases} \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{B_n \mu_o \left(\ln \frac{R_k}{R_c} + \omega \right)}, & \Delta P \geq \Delta P_n \\ \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{B_n \left(\mu_m \ln \frac{r_m}{R_c} + \frac{\Delta H \mu_o + \Delta \mu H_r}{\Delta H} \ln \frac{\frac{\Delta \mu}{\Delta H} + \frac{\mu_o}{H_r}}{\frac{\Delta \mu}{\Delta H} + \frac{\mu_m}{H_m}} + \mu_o \left(\ln \frac{R_k}{R_c} + \omega \right) \right)}, & \Delta P_n \leq \Delta P \leq \Delta P_m \\ \frac{2\pi kh(P_k - P_c)}{B_n \mu_m \left(\ln \frac{R_k}{R_c} + \omega \right)}, & \Delta P \leq \Delta P_m \end{cases}$$

4.2 REPRESENTACIÓN DE LOS MODELOS CON MATLAB

FIGURA 4.1 Solubilidad vs Temperatura

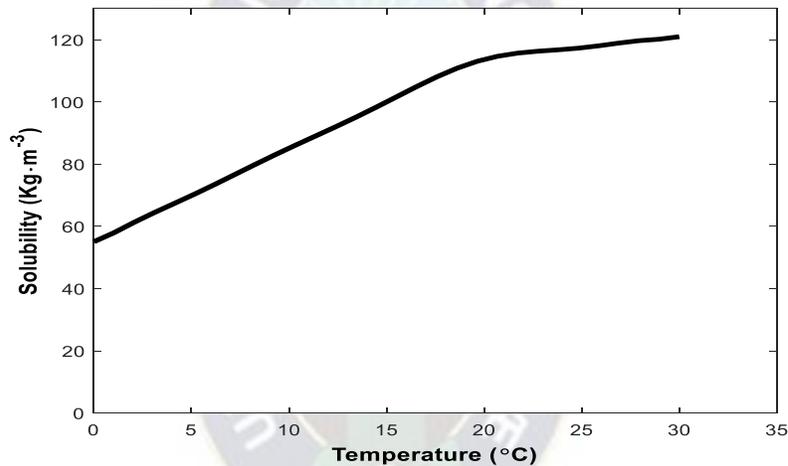


Fuente: Elaboracion Propia

CÓDIGO:

```
x = [0:.1:22];
y = .2*exp(0.207*x);
plot(x, y, 'k', 'Linewidth', 3)
xlabel('Temperature \circ C'),...
      'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k')
ylabel('Solubility (Kg\cdotm^{-3})'),...
      'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k')
axis([0 25 0 22])
```

FIGURA 4.2 Solubilidad vs Temperatura

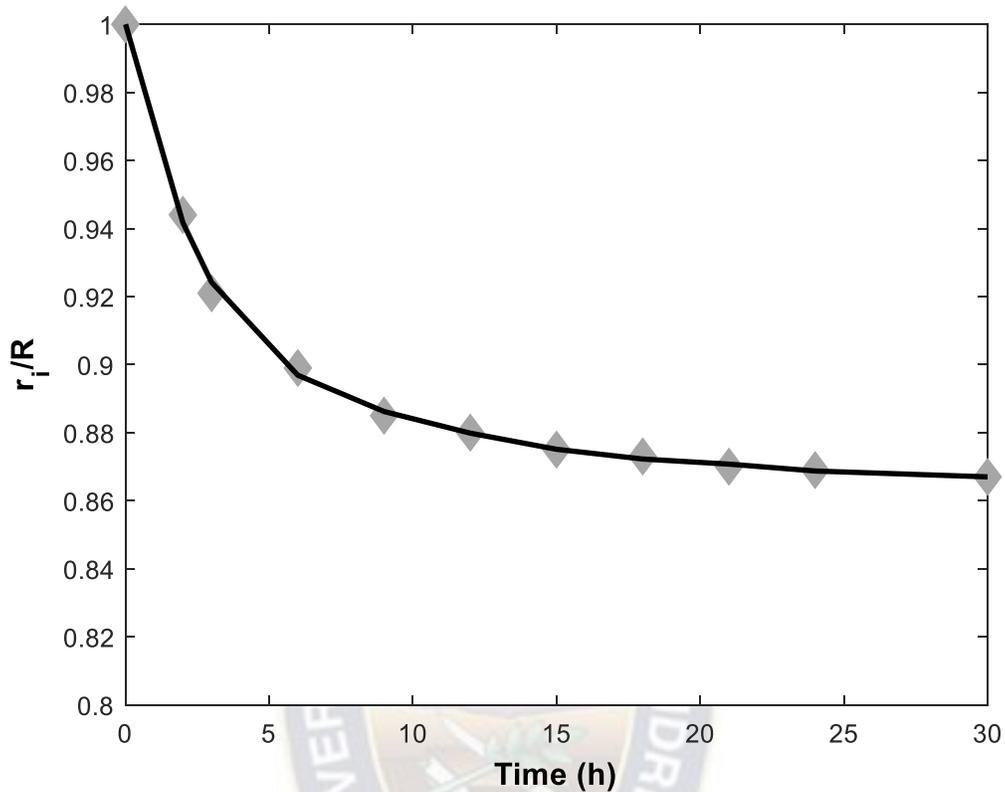


Fuente: Elaboracion Propia

CÓDIGO:

```
x = linspace(0,30,30);
y = 55 + 3*x;
for i=21:30
    y(i) = y(i-1) + .7;
    i = i+1;
end
ec = polyfit(x, y,10);
x2 = polyval(ec,x);
plot(x, x2, 'k', 'Linewidth', 3)
xlabel('Temperature (\circC)'),...
      'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k')
ylabel('Solubility (Kg\cdotm^{-3})'),...
      'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k')
axis([0 35 0 130])
```

FIGURA 4.3 Radio vs Tiempo

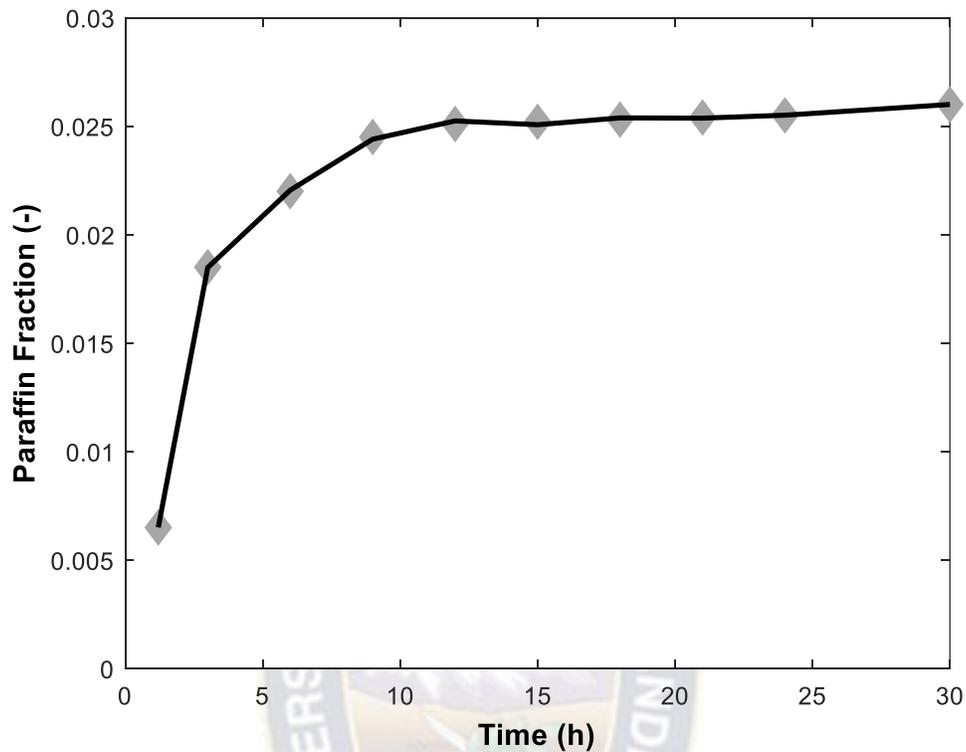


Fuente: Elaboracion Propia

CÓDIGO:

```
x = [0 2 3 6 9 12 15 18 21 24 30];
y = [1 0.944 0.921 0.899 0.885 0.885 0.880 0.875 0.873 0.870 0.869 0.867];
plot(x, y,...
     'LineStyle', 'none',...
     'Marker', 'd',...
     'MarkerEdgeColor', [0.65 0.65 0.65],...
     'MarkerFaceColor', [0.65 0.65 0.65],...
     'MarkerSize',10)
hold on
ec = polyfit(x,y,6);
x2 = polyval(ec,x);
plot(x, x2,'k','Linewidth',2)
hold off
xlabel('Time (h)','FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k')
ylabel('r_i/R','FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k')
axis([0 30 0.8 1])
```

FIGURA 4.4 Fraccion Parafinica vs Tiempo

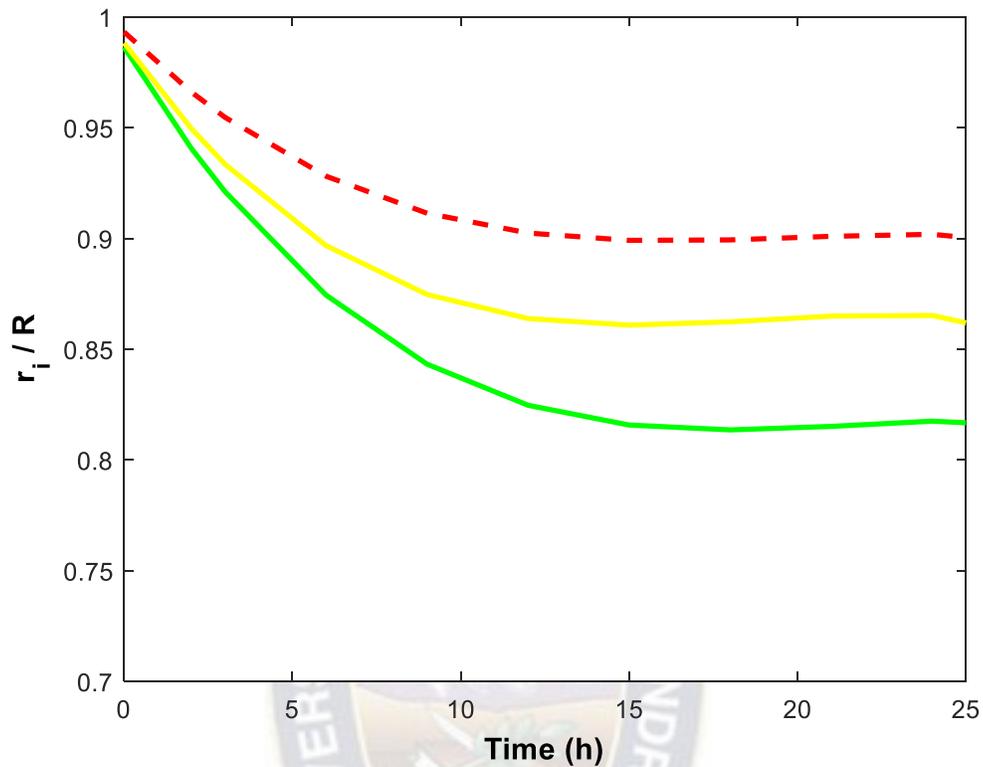


Fuente: Elaboracion Propia

CÓDIGO:

```
x = [1.2 3 6 9 12 15 18 21 24 30];
y = [0.0065 0.0185 0.022 0.0245 0.0251 0.0252 0.0253 0.0254 0.0255
0.026];
plot(x, y,...
      'LineStyle', 'none',...
      'Marker', 'd',...
      'MarkerEdgeColor', [0.65 0.65 0.65],...
      'MarkerFaceColor', [0.65 0.65 0.65],...
      'MarkerSize',10)
hold on
ec = polyfit(x,y,8);
x2 = polyval(ec,x);
plot(x, x2,'k','Linewidth',2)
hold off
xlabel('Time (h)','FontSize',12,...
       'FontWeight','bold','Color','k')
ylabel('Paraffin Fraction (-)',...
       'FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k')
axis([0 30 0 0.03])
```

FIGURA 4.5 Radio VS Tiempo

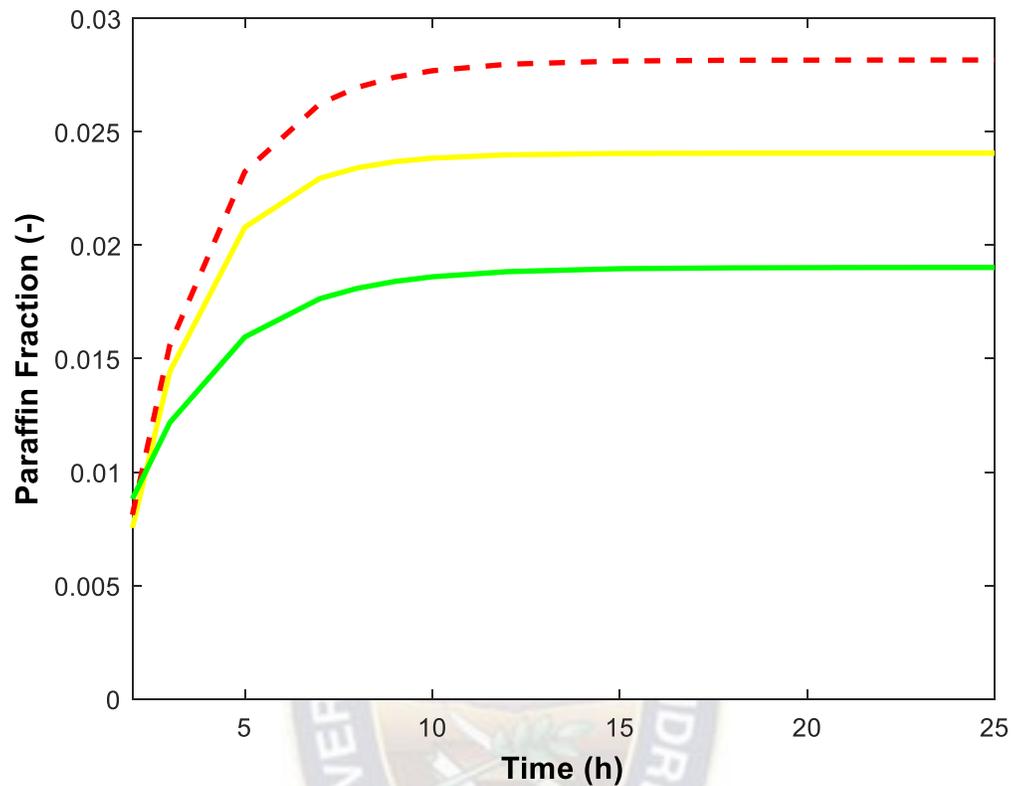


Fuente: Elaboracion Propia

CÓDIGO:

```
x = [0 2 3 6 9 12 15 18 21 24 30];  
y = [1 0.93 0.92 0.86 0.84 0.835 0.83 0.82 0.81 0.80 0.82];  
  
ec = polyfit(x,y,3);  
x2 = polyval(ec,x);  
plot(x, x2,'g','Linewidth',2)  
  
hold on  
y1 = [1 0.94 0.93 0.89 0.87 0.875 0.87 0.865 0.86 0.855 0.85];  
ec = polyfit(x,y1,3);  
x2 = polyval(ec,x);  
plot(x, x2,'y','Linewidth',2)  
  
y2 = [1 0.96 0.95 0.93 0.91 0.905 0.902 0.901 0.90 0.897 0.895];  
ec = polyfit(x,y2,3);  
x2 = polyval(ec,x);  
plot(x, x2,'r--','Linewidth',2)
```

FIGURA 4.6 Parafina vs Tiempo



Fuente: Elaboracion Propia

CÓDIGO:

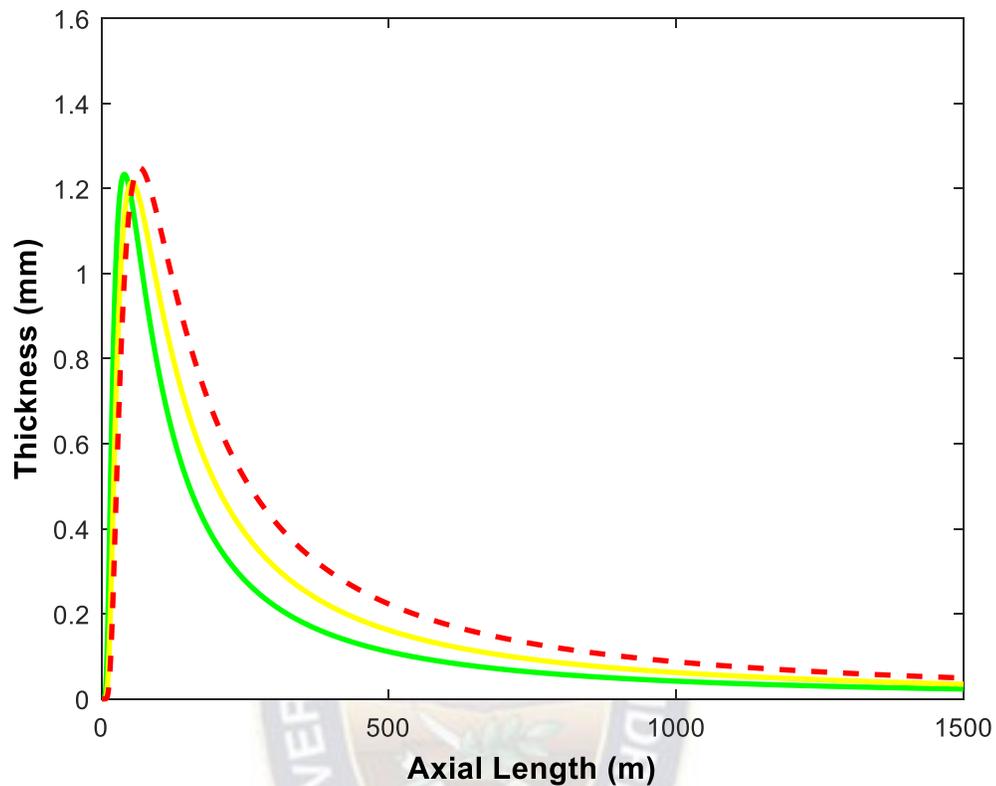
```
x = [2 3 5 7 8 9 10 12 15 18 21 24 30];
y = [0.006 0.018 0.019 0.021 0.0225 0.023 0.0235 0.0239 0.024 0.0245
0.025 0.0252 0.0253];

f = @(b,x) b(1).*exp(b(2).*x)+b(3);
B = fminsearch(@(b) norm(y - f(b,x)), [-200; -1; 100])
plot(x, f(B,x), 'y', 'Linewidth', 2)

hold on
y1 = [0.006 0.02 0.022 0.024 0.026 0.0265 0.027 0.0275 0.028 0.0285
0.029 0.0295 0.030];
f = @(b,x) b(1).*exp(b(2).*x)+b(3);
B = fminsearch(@(b) norm(y1 - f(b,x)), [-200; -1; 100])
plot(x, f(B,x), 'r--', 'Linewidth', 2)

y2 = [0.007 0.015 0.016 0.0165 0.017 0.0176 0.018 0.0185 0.019 0.0193
0.0196 0.0199 0.021];
f = @(b,x) b(1).*exp(b(2).*x)+b(3);
```

FIGURA 4.7 *Espesor vs Longitud Axial*

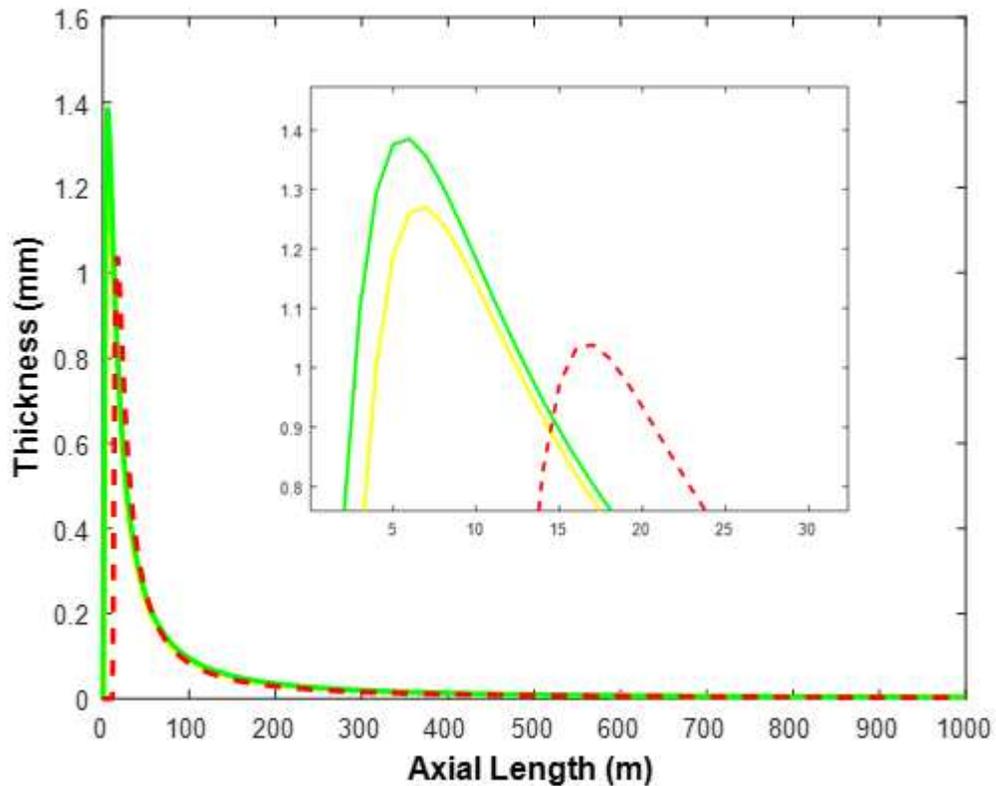


Fuente: Elaboracion Propia

CÓDIGO:

```
x = linspace(0,1500,1500);  
y = 320*((sqrt(60/pi)).*(1./((x).^(1.5)))).*exp(-60./(x));  
plot(x, y, 'r--', 'Linewidth', 2)  
  
hold on  
y1 = 420*((sqrt(80/pi)).*(1./((x).^(1.5)))).*exp(-80./(x));  
plot(x, y1, 'g', 'Linewidth', 2)  
y2 = 540*((sqrt(100/pi)).*(1./((x).^(1.5)))).*exp(-100./(x));  
plot(x, y2, 'b', 'Linewidth', 2)  
hold off  
  
xlabel('Axial Length (m)',...  
      'FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k')  
ylabel('Thickness (mm)',...  
      'FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k')  
axis([0 1500 0 1.6])
```

FIGURA 4.8 Espesor vs Longitud Axial



Fuente: Elaboracion Propia

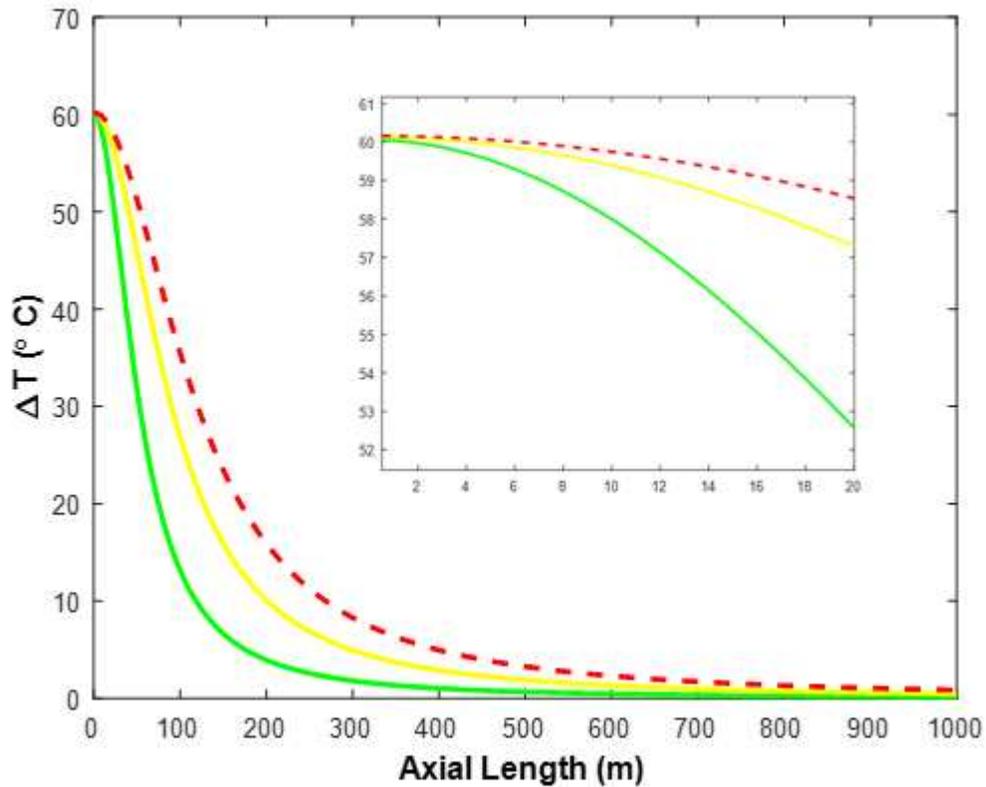
CÓDIGO:

```
x = linspace(0,1000,1000);
y2 = 55*((sqrt(10/pi)).*(1./((x).^(1.5))))).*exp(-10./(x));
plot(x, y2,'y','Linewidth',2)

hold on
y1 = 60*((sqrt(10/pi)).*(1./((x+1).^(1.5))))).*exp(-10./(x+1));
plot(x, y1,'g','Linewidth',2)
y = 45*((sqrt(10/pi)).*(1./((x-10).^(1.5))))).*exp(-10./(x-10));
plot(x, y,'r--','Linewidth',2)
hold off

xlabel('Axial Length (m)',...
      'FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k')
ylabel('Thickness (mm)',...
      'FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k')
axis([0 1000 0 1.6])
```

FIGURA 4.9 Variación de Temperatura vs Longitud Axial



Fuente: Elaboracion Propia

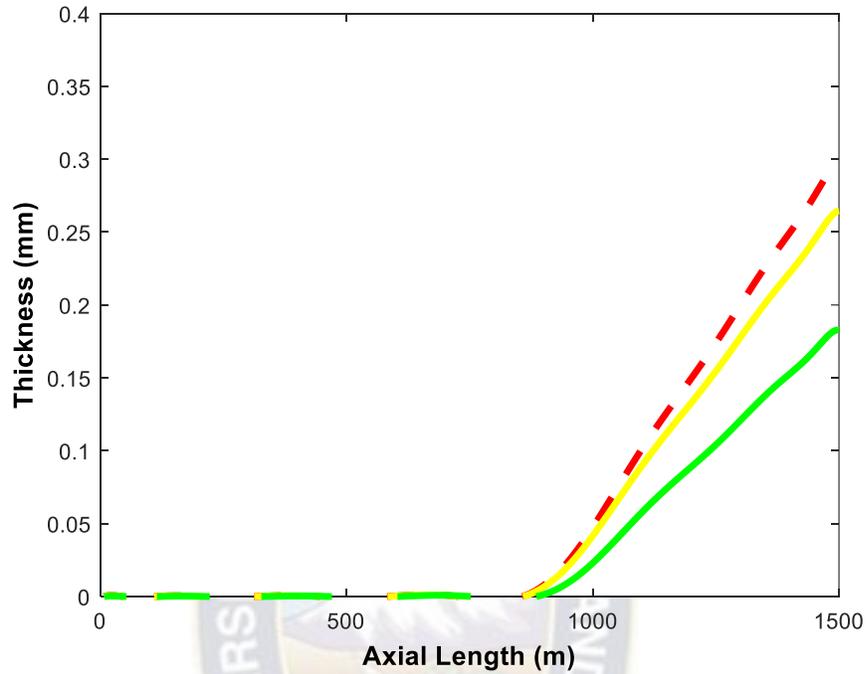
CÓDIGO:

```
x = linspace(0,1000,1000);
y = 10000*(1./pi)*(53./(53^2+x.^2));
plot(x, y,'g','Linewidth',2)

hold on
y1 = 17000*(1./pi)*(90./(90^2+x.^2));
plot(x, y1,'y','Linewidth',2)
y2 = 22680*(1./pi)*(120./(120^2+x.^2));
plot(x, y2,'r--','Linewidth',2)
hold off

xlabel('Axial Length (m)',...
      'FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k')
ylabel('\DeltaT (\circ C)',...
      'FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k')
```

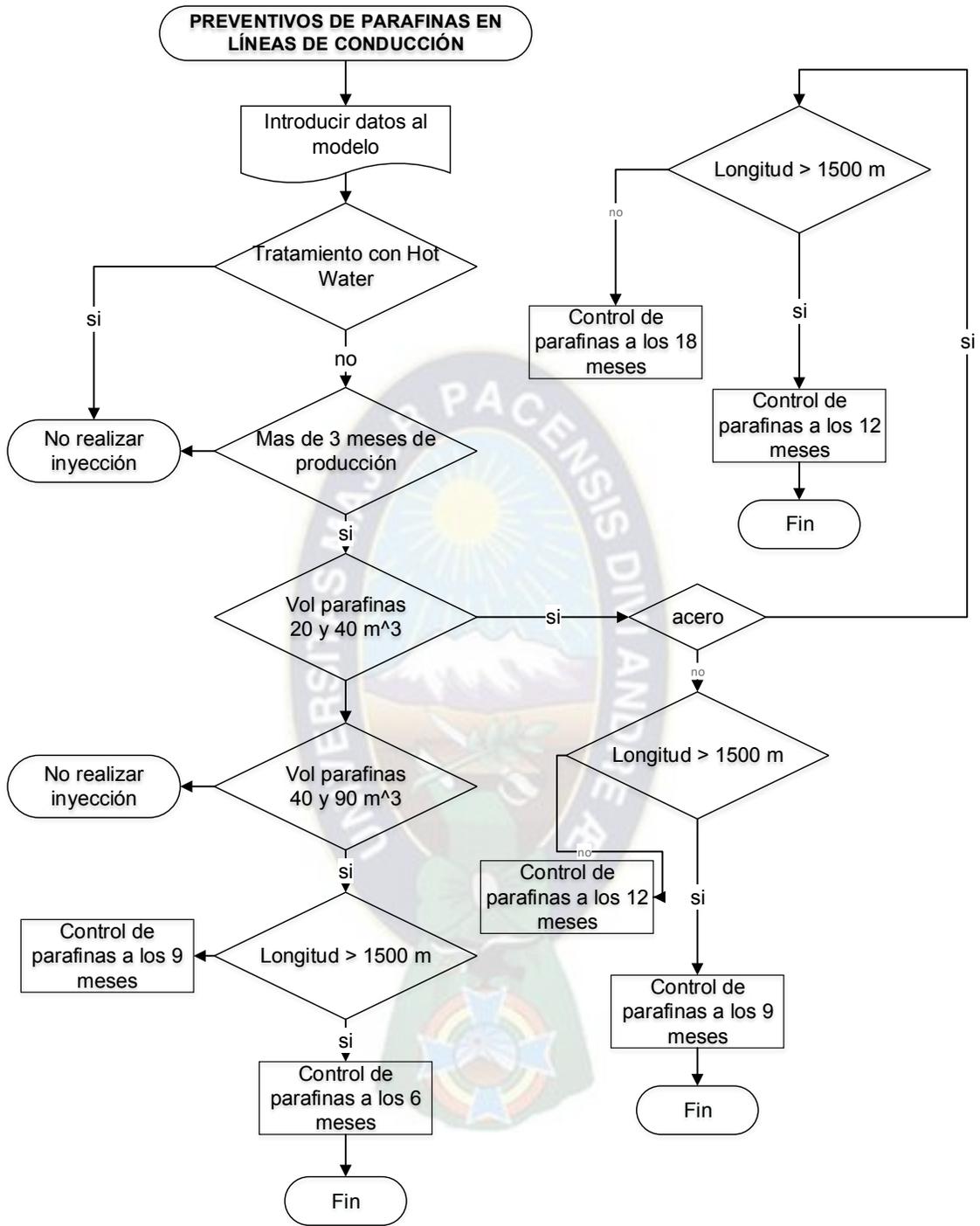
FIGURA 4.10 *Espesor vs Longitud Axial*



Fuente: Elaboracion Propia

CÓDIGO:

```
x = linspace(0,1500,1500);
for i=900:1500
    y(i) = -0.45 + (0.25/500)*x(i);
    i=i+1;
end
ec = polyfit(x,y,15);
x2 = polyval(ec,x);
plot(x,x2,'r--','Linewidth',3)
hold on
for i=900:1500
    y(i) = -0.402 + (0.223/500)*x(i);
    i=i+1;
end
ec = polyfit(x,y,15);
x2 = polyval(ec,x);
plot(x,x2,'y','Linewidth',3)
for i=900:1500
    y(i) = -0.295 + (0.16/500)*x(i);
    i=i+1;
end
ec = polyfit(x,y,15);
x2 = polyval(ec,x);
plot(x,x2,'g','Linewidth',3)
```



CAPITULO V: ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

5.1 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA

5.1.1 Análisis FODA

A continuación, se presenta el siguiente análisis de fortalezas oportunidades debilidades y amenazas sobre el estudio y levantamiento de datos de la evaluación de tratamiento de la viscosidad.

Tabla 5. 1: Análisis FODA

FORTLEZA	DEBILIDADES
<ul style="list-style-type: none">➤ Matlab modela pérdida de líquido indirectamente desde gabinete sin necesidad de estar en campo.➤ Existe personal totalmente capacitado para la programación de métodos cuantitativos en macros excel.➤ Se cuenta con Tecnología adecuada (computadoras, compresores, válvulas)➤ Existen profesionales que se capacitan a diario para el control de La Viscosidad➤ Relativamente económico	<ul style="list-style-type: none">❖ No conocer bastante sobre softwares de control de tratamiento de la viscosidades en tanques❖ Se debe seguir periodos estrictos de mantenimiento e implica un costo.❖ falta de presupuesto para Innovación y compra de Software .

OPORTUNIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Material a bajo costo. ✓ Crecimiento de la demanda de diésel y se genera mayor oferta laboral para este tipo de propuestas. ✓ 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 pérdidas. • Las normativas ambientales siempre cambian • Se debe capacitar constantemente al personal

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

5.2 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA

5.2.1 Costos fijos

A continuación, se presentan los costos fijos considerando los costos de simulación y los costos de los equipos de tratamiento de viscosidad:

Tabla 5. 2: Análisis de costos

COSTOS FIJOS EN BOLIVIANOS		
	Mensual	Tipo
COSTOS FIJOS		
ALQUILERES	-	adm
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 TANQUES	30.000	operativo
GASTOS GRALES. DE LEVANTAMIENTO DE DATOS	5.000	Ventas
IMPUESTOS	5.750	
INTERÉS	-	
TOTAL COSTO FIJO MES	114.750	

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

El costo fijo de levantamiento del proyecto para el estudio y producción mensual es de 114750 bolivianos

5.2.2 Costos Variables

A continuación, se presentan los costos variables en bolivianos considerando los costos de análisis del proyecto

Tabla 6. 1 Costos variables

COSTOS VARIABLES			
COSTOS VARIABLES	Cantidad	V/r Unit	Mensual
Accesorios	10	200,00	2.000
Válvulas	5	3.500,00	17.500
Filtros	5	1.400,00	7.000
Soldadura	2	10.000,00	20.000
Compresor de aire	3	14.000,00	42.000
Pérdida de Líquido	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, 2022

El costo variable de levantamiento del proyecto para el tratamiento de la viscosidad es de 148979 bolivianos

5.2.3 Depreciación anual del proyecto

Para la inversión inicial del proyecto se cuenta con la siguiente tabla:

Tabla 5. 3: Depreciación anual del proyecto

PROPIEDAD REFINERÍA Y EQUIPO	Valor	Vida Útil/ Años	Depreciación Anual
Tanques nuevos	56000	8	7000
Laboratorio de equipos de viscosidad	2000	6	333,3333333
Ductos	38000	10	3800
Computadora	3800	4	950
Válvula	6484,3	10	648,43
Cascos	200	5	40
Guantes	750	10	75
Trajes de seguridad	700	10	70
Accesorios	445	10	44,5
PLCs	16895,2	10	1689,52
Vehículo	140000	5	28000
Filtro	3500	10	350
Impresoras	1000	5	200
Total	211.775		35.867

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

La depreciación anual del proyecto es de 35867 Bolivianos

5.2.4 Inversión inicial del proyecto

Se tiene la siguiente tabla donde se describe la inversión total del proyecto inicial

Tabla 5. 4: Capital de trabajo

COSTOS FIJOS AL MES	114.750
COSTOS VARIABLES AL MES	148.979
DOS MESES DE COSTOS Y GASTOS	478.900
GASTOS DE PREOPERATIVOS	26.500
Materia Prima	115.463
TOTAL INVERSION INICIAL	594.363
DEUDA	2.000.000
RECURSOS SOCIOS	(1.405.637)
INFLACIÓN PROYECTADA - VENTAS	4,7%
INCREMENTO COSTOS	3,7%

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

La inversión inicial del levantamiento de datos, la simulación la compra de nuevos equipos de tratamiento de la viscosidad es de 594363 Bolivianos, lo que aproximadamente equivale a medio millón de bolivianos.

5.2.5 Flujo de caja con pérdidas iniciales de líquido

Para un análisis de tres años, se tiene:

Tabla 5. 5: Flujo de caja

	0	1	2	3
INGRESOS	-	Bs5.132.160,00	Bs5.373.371,52	Bs5.625.919,98
(-)COSTOS DE VENTAS	-	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	-	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
(+) AMORTIZACION DIFERIDOS	-			
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
Provisiòn 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	-	Bs1.814.400,93	Bs1.915.415,99	Bs2.018.308,41

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

5.3 ESTUDIO DE TIR Y VAN

5.3.1 Estudio del Van

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:

$$VAN = -I_o + \sum_{t=0}^T \frac{X_t}{(1+r)^T} \quad (6.1)$$

Donde:

VAN = Valor Actual neto

I_o = Inversion 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 productos combustibles anteriormente calculados:

Tabla 5. 6: Flujo de caja por año para demostrar el VAN

Años	Flujo de Caja [Bs]
2024	1.934.400
2025	1.934.400

Fuente: Elaboración propia, 2023

Por lo tanto proyectando para dos años se tiene:

$$VAN = - 1.762.684,82 \text{ Bs} + \frac{1.934.400}{(1 + 0.15)^1} + \frac{1.934.400}{(1 + 0.15)^2}$$

$$VAN = 1382086$$

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:

$$VAN = 1382086 > 0 \text{ Por lo tanto es rentable}$$

5.3.2 Estudio del TIR

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 formula:

$$\sum_{n=0}^N \frac{FC}{(1 + TIR)^n} - I_o = 0 \quad (6.2)$$

Reemplazando se tiene:

$$0 = - 1.762.684,82 \text{ Bs} + \frac{1.934.400}{(1 + TIR)^1} + \frac{1.934.400}{(1 + TIR)^2}$$

Resolviendo:

$$1.762.684,82 = \frac{1.934.400}{(1 + TIR)^1} + \frac{1.934.400}{(1 + TIR)^2}$$

$$1.762.684,82(1 + 2 * TIR + TIR^2) = 1934400 * (1 + TIR) + 1934400$$

$$TIR^2 = 1,097 * (2 + TIR) - 2 * TIR - 1$$

$$TIR^2 + 0,903 * TIR - 1,194 = 0$$

$$TIR = 73,08 \%$$

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

5.4 ANÁLISIS DE COSTO Y BENEFICIO

La siguiente tabla puede usarse como indicador para determinar si los costos de medida de seguridad en el tanque superan sus beneficios:

Tabla 5. 7: 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

Por lo tanto, usando la ecuación:

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

Para los dos años de financiamiento:

$$\frac{B}{C} = \frac{[(1934400 - 1556830) + 1934400]Bs}{1.762.684,82 Bs}$$

$$\frac{B}{C} = 1,31$$

Sobra el 31 % del presupuesto planteado, por lo tanto el proyecto es factible ya que sobrar  dinero después del levantamiento de datos.

5.5 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 5. 8: Parámetros económicos

FLUJO DE CAJA LIBRE	
VALOR PRESENTE NETO	1382086
TIR	73,08 %
Rel Ben / Costo	1,31

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2022

Se observa que la relación costo beneficio es de 1,31 lo cuál la utilidad se puede afirmar que es alta y afirmar que el proyecto se financiará en menos de dos años y el TIR equivale al 73,08 % porque traduciendo que que los costos de inversión serán cubiertos cada año.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Se llegaron a las siguientes conclusiones:

- A partir de los cálculos realizados en la aplicación respectiva y la simulación, se utilizó el modelo de flujo viscoplástico no lineal para determinar la viscosidad de la producción de crudo del campo Cambeiti. Todo esto debía estar respaldado por los siguientes objetivos específicos:
- Las condiciones finales de calidad del vapor, presión y temperatura en la inyección cíclica de vapor están determinadas por la viscosidad del crudo. Por lo tanto, fue posible generar un modelo simplificado con un bajo costo computacional utilizando hojas de cálculo y programándolas.
- Las soluciones que surjan de los modelos serán únicamente los parámetros físicos del yacimiento, las condiciones de línea e inyección inicial de vapor como presión, temperatura y calidad del vapor mediante la implementación real de lo que son los modelos matemáticos para sus aplicaciones en simuladores. Los métodos se han programado en una hoja de cálculo para su cálculo y futura referencia de los datos calculados para ser ingresados al simulador.
- La presión se determinó a partir de gráficos y tablas que se proporcionaron en términos de modelos matemáticos viscoplásticos en función de la temperatura y la calidad del vapor.
- La simulación se realizó utilizando Wolfram Matico. Se ha comprobado que el caudal máximo rentable del pozo se puede alcanzar a una presión de 10 MPa. El caudal mínimo rentable de petróleo, de 3,5 a 4,5 m³ por día, se

alcanzaría a una temperatura de 40 a 50 °C. El caudal máximo previsto de petróleo es de 15 m³.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda el control de la viscosidad de producción con este método de visco-plásticos para un control eficiente del crudo para evitar el aumento de flujo de este ya que se considera de muy bajo costo el uso de estas herramientas computacionales.
- Se recomienda optimizar el proyecto para diferentes periodos de tiempo, ya que la demanda de crudo puede incrementar y así también disminuir, según la demanda del mercado, lo que conlleva el uso del método descrito y aplicado en el presente proyecto para el control de la Viscosidad de manera eficaz.
- Se recomienda usar el modelo matemático propuesto para que la producción ya sea en la propuesta del control de la producción en la planta de crudo y demás proyectos en el país sean de manera óptima.

BIBLIOGRAFIA

1. Astafev VI, Roters PV (2014) Simulation of oil recovery using the Weierstrass elliptic functions. *Int J Mech* 8:359–370
2. Astafev VI, Olkhovskaya VA, Gubanov SI (2016) Warm-up of layer in well with dual-well system and intensification of highviscosity oil production. *Oil Ind* 2:66–69
3. Basniev KS, Dmitriev NM, Chilingar GV (2012) Filtration of non-Newtonian liquid. In: *Mechanics of fluid flow*, chap. 25. Wiley, New York, pp 489–512. doi:10.1002/9781118533628.ch25
4. Bernadiner MG, Entov VM (1975) *Hydrodynamic theory of anomalous fluid flow through porous media*. Nauka, Moscow (in Russian)
5. Bingham EC (1922) *Fluidity and plasticity*. McGraw-Hill, New York
6. Bird RB, Armstrong RC, Hassager O (1987) *Dynamic of polymeric liquids—vol 1: fluid mechanics*, 2nd edn. Wiley, New York
7. Carreau PJ, DeKee DCR, Chhabra RP (1997) *Rheology of polymeric systems: principles and applications*. Hanser Publications, Munich
8. Casson N (1959) Flow equation for pigment oil suspensions of the printing ink type. In: Mill CC (ed) *Rheology of disperse systems*. Pergamon Press, New York, pp 84–104

9. Chhabra PR, Richardson JF (2008) Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications, 2nd edn. Butterworth-Heinemann, Oxford
10. Chhabra RP, Comiti J, Machac I (2001) Flow of non-Newtonian fluids in fixed and fluidised beds. *Chem Eng Sci* 56:1–27
11. Dake LP (2001) The practice of reservoir engineering (revised edition). Shell Internationale Petroleum Maatschappij BV, The Hague
12. Devlikamov VV, Habibullin ZA, Kabirov MM (1975) Abnormal oil. Nedra Publishers, Moscow (in Russian)
13. Dietz DN (1965) Determination of average reservoir pressure from build-up surveys. *J Petrol Technol* 17(8):955–959
14. Gafarov SA, Shamaev GA (2005) A study of filtering parameters of non-Newtonian oil in the flow in carbonate porous media. *Oil and Gas Business*. <http://www.ogbus.ru/authors/Gafarov/> Gafarov_3.pdf (in Russian)
15. Herschel WH, Bulkley R (1926) Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollosungen. *Kolloid Zeitschrift* 39:291–300
16. Khasanov MM, Bulgakova GT (2003) Nonlinear and nonequilibrium effects in the rheologically complex media. Institute of Computer Science, Moscow-Izhevsk (in Russian)
17. Ionescu CM, Birs IR, Copot D, Muresan CI, Caponetto R. 2020 Mathematical modelling with experimental validation of viscoelastic properties in non-Newtonian fluids. *Phil. Trans. R. Soc. A* **378**: 20190284. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2019.0284> Accepted: 2 March 2020

ANEXOS

Código

```
function varargout = untitled(varargin)
% UNTITLED MATLAB code for untitled.fig
%   UNTITLED, by itself, creates a new UNTITLED or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = UNTITLED returns the handle to a new UNTITLED or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   UNTITLED('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in UNTITLED.M with the given input arguments.
%
%   UNTITLED('Property','Value',...) creates a new UNTITLED or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before untitled_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to untitled_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help untitled

% Last Modified by GUIDE v2.5 11-Mar-2021 20:30:13

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @untitled_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @untitled_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before untitled is made visible.
function untitled_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
```

```

% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin command line arguments to untitled (see VARARGIN)

% Choose default command line output for untitled
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes untitled wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = untitled_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global ca;
ca=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)

```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global k;
k=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
```

```
% See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global h;
h=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
```

```
% See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
global rk;
rk=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
global rc;
rc=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

global hr;
hr=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global hm;
hm=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global rm;
rm=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit9 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global rd;
rd=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit10 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit10 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global bn;
bn=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit11 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global u0;
u0=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit12 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit12 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global um;
um=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit13 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit13 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit14_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit14 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit14 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit14 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function edit14_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to edit14 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

```

```

%       See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton2.

```

```

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

global ca;

```

```

global k;

```

```

global h;

```

```

global rk;

```

```

global rc;

```

```

global hr;

```

```

global hm;

```

```

global rm;

```

```

global rd;

```

```

global bn;

```

```

global u0;

```

```

global um;

```

```

deltah=hm-hr;

```

```

deltau=u0-um;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

numerador=2*pi*k*h;

```

```

w=log(sqrt((2.2458*pi)/ca));

```

```

denomextremos=bn*(w+log(rk/rc));

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
calculo Q cuando delta P es menor igual a delta Pn

```

```

global Qprimer;

```

```

Qprimer=numerador/(u0*denomextremos)

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

comp1=um*bn*log(rm/rc);
dosuno=(deltah*u0+deltaiu*hr)/deltah;
dosdos=log( ( (deltaiu/deltah)+(u0/hr) ) / ( (deltaiu/deltah)+(um/hm) ) );
comp2=dosuno*dosdos*bn;
%%%%%calculo Q cuando deltaPn<= deltaP <= deltaPm
global Qsegundo;
Qsegundo=numerador/(comp1+comp2+u0*denomextremos)
%%%%%calculo Q cuando delta P<= delta Pm
global Qtercero;
Qtercero=numerador/(um*denomextremos)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
deltaPm=hm*rk*denomextremos
deltaPn=hr*rk*denomextremos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x=linspace(0,deltaPn,20);
y=linspace(deltaPn,deltaPm,20);
z=linspace(deltaPm,100000,20);
plot(handles.axes1,x,Qprimer*x,y,Qsegundo*y,z,Qtercero*z);
xlabel('delta P(MPa)');
ylabel('Caudal Q(m3)');
grid
%
%
%
%

```

```

function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit15 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit15 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit15 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit15 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit16_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit16 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit16 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit16 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit16_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit16 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

GLOSARIO

Viscosidad aparente: Es el esfuerzo de corte por la tasa de cizallamiento, cuando el cociente es dependiente de la tasa de cizallamiento. También puede llamarse viscosidad o corte de viscosidad.

Modelo de Bingham: Un modelo se comporta como un sólido elástico bajo el retroceso de una fuerza: Por encima de de la tensión de fluencia, la tasa de cizallamiento es directamente proporcional a la fuerza de corte menos la tensión de cizallamiento.

Biorheology: Es el estudio del comportamiento reológico de a materia orgánica.

Complejo de docilidad: La expresión matemática de conformidad de la suma de las partes reales e imaginarias. Las partes reales son a veces llamadas de fuerte docilidad y las imaginarias de perdida de docilidad. J^* (corte) Pa. a la -1 .

Módulo complejo: La representación matemática de la suma de los módulos reales e imaginarios. Las partes reales son algunas veces llamadas módulos de esfuerzo y las imaginarias módulo perdidos G^* (por esfuerzo) Pa.

Complejo de viscosidad: Es la representación matemática de la suma de la viscosidad de sus partes reales e imaginarias. La parte real es usualmente llamada viscosidad dinámica, la parte imaginaria es relativa a la parte real del modulo de complejo de esfuerzo n^* Pa.s.

Docilidad: la tensión divisora del correspondiente estrés J^* Pa. a la -1 .

Consistencia: El término general para la propiedad de la materia la cual es permanentemente resistente al cambio de forma.

Ecuación constitutiva: ecuación relativa al estrés, tensión, tiempo y algunas veces otras variables como la temperatura. A veces llamada reológicamente ecuación de estado.

Continua reológica: la reología que trata de materiales continuos sin explícita consideración de las microestructuras. A veces llamada macro reología y reología fenomenológica.

Flujo Couette (circular): Simple corte de fluidos entre dos anillos coaxiales cilíndricos en relativa rotación.

Flujo Couette (plano): Simple corte de fluidos entre planos paralelos en relativo movimiento en su propio plano.

Desnatado: el aumento de las partículas de una fase dispersa en una superficie de suspensión.

Escurrimiento: La lenta deformación de un material; usualmente medido bajo un constante estrés.

Amortiguador: un modelo de un flujo newtonianos, típicamente representado por un pistón en movimiento en un cilindro con líquido.

Número de Deborah: La proporción de un tiempo característico (de relajamiento) de un material a un tiempo característico del proceso de deformación relevante.

Deformación: Cambio de forma, volumen o ambos

Hinchamiento marchitante: es un hinchamiento post extracción.

Dilatación: Incremento de volumen causado por cizallamiento. Espesamiento de corte (en des uso)

Modulo dinámico: Sinónimo de modulo complejo.

Viscosidad dinámica: en la mecánica clásica de fluidos es sinónimo del coeficiente de viscosidad usado para distinguir la cantidad cinética viscosa.

En reología, el cociente de la parte de la tensión en fase con la velocidad de la mancha por la tasa de deformación bajo condición sinusoidal n.Pa.s

Elasticidad: Reversión e la tensión / comportamiento de deformación



2024-TTES-1580-D-1

**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS**
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-3362/2024
La Paz, 29 de octubre de 2024

VISTOS:

La solicitud de inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **25 de octubre de 2024**, por **EDDY FRANZ CUSSI TITO** con **C.I. N° 7027974 LP**, con número de trámite **DA 1937/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO EN EL CAMPO CAMBEITI A TRAVÉS DE ESTRATEGIAS DE CONTROL NO LINEAL VISCOPLÁSTICO"**, 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"*

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 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 N° 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"*



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 575,
entre Esq. Uruguaay y
C. Batallón Illimani,
Telfs: 2795708
2795706 - 2795701

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguaay, Calle
prolongación Quijano,
N° 20, Edif. Bicentenario,
Telfs: 3279732 - 32042996

Oficina - Cochabamba
Calle Bolivia, N° 122,
entre 16 de Julio y Antezana,
Telfs: 4941489 - 32042967

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2568
Edif. Multicentro El Ceibo
Lto. Piso 2, Of. 5B,
Zona 16 de Julio,
Telfs: 2148201 - 22943229

Oficina - Chapinero
Calle Kilómetro T, N° 266
cuz esq. Uriolagaita,
Zona Parque Bolívar,
Telf: 12929873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calle Ciro Trigo y Avaroa
Edif. Santa Clara, N° 243,
Telf: 12992286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre, N° 3822,
entre Ayacucho
y Junín, Galería Central,
Of. 1A,
Telf: 6220338

Oficina - Potosí
Av. Villalón entre calles
Wenceslao Albo y San Alberto,
Edif. AM, Salinos N° 242,
Frente PISA, Of. 1E,
Telf: 7207960

www.senapi.gob.bo



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: **"OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO EN EL CAMPO CAMBEITI A TRAVÉS DE ESTRATEGIAS DE CONTROL NO LINEAL VISCOPLÁSTICO"** a favor del autor y titular: **EDDY FRANZ CUSSI TITO** con **C.I. N° 7027974 LP** bajo el seudónimo **EDIÑO**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/m

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI
CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO
DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS
LA PAZ - BOLIVIA

Firma:



MAE0w1Bv9Tv28L

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PAGINA WEB www.senapi.gob.bo/verificacion Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACION O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz
Av. Mierles, N° 555,
entre Esq. Uruguay y
C. Sotación Miraflores.
Teléfono: 2105700
2105701 - 2105701

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quiroga,
N° 20, Edif. Bicentenario.
Teléfono: 3227552 - 32242906

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 105,
entre 16 de Julio y Antioquia.
Teléfono: 4941400 - 39942967

Oficina - Oruro
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multiambiente El Ceño
Urb. Pico 2, Of. 58.
Zona 16 de Julio.
Teléfono: 2149001 - 32940029

Oficina - Sucre
Calle Kilómetro T, N° 286
Casi esq. Limfogalera,
Zona Parque Bolívar.
Teléfono: 32005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calles Cero Trigo y Avaros
Edif. Santa Clara, N° 243.
Teléfono: 32252286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre, N° 583C,
entre Ayacucho
y Junín, Galería Central,
Of. 14.
Teléfono: 62201338

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Menesio de Alva y San Alberto,
Edif. AM, Salinas N° 242,
Paseo Potosí, Of. 11.
Teléfono: 7208960

www.senapi.gob.bo



Autor: Eddy Franz Cussi Tito

Correo electrónico: cussi.7027974@gmail.com

Celular: +591 67035833