

# EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE HIDRATOS DURANTE LA PERFORACIÓN OFFSHORE



**YURY TATIANA CÁRDENAS HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

**EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE HIDRATOS DURANTE LA  
PERFORACIÓN OFFSHORE**

**YURY TATIANA CÁRDENAS HERNÁNDEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Química**

**Director:**

**Ph.D. FERNANDO VIEJO ABRANTE**

**Codirector:**

**Ing. JAIME ALBERTO LOZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

## **DEDICATORIA**

Cada etapa de la vida nos permite afrontar nuevos retos y poner a prueba nuestras habilidades para conquistar un sueño y es ahí en ese continuo camino donde construimos una muralla de conocimiento.

Este trabajo lo dedico primeramente a Dios a quien muchas noches he acudido buscando razones y respuestas.

A mis padres Rosalva Hernández y Desiderio Cárdenas quienes desde muy niña han sido mis grandes maestros y a pesar de los obstáculos siempre me han apoyado y han creído en mí.

A mi chata linda que siempre me ha acompañado en cada etapa de mi vida dándome un motivo para sonreír y a mis amores Angelly y Fercha para que nunca desistan en alcanzar sus metas.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la universidad Industrial de Santander por brindarme los conocimientos necesarios para ser profesional, a la escuela de ingeniería química por fortalecerme como persona íntegra.

Al instituto Colombiano de Petróleos-Ecopetrol por la experiencia de estar más cerca de la industria y al grupo de investigación Estabilidad de pozo por darme la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos y reforzar los ya adquiridos.

Al Dr Fernando Viejo por su apoyo incondicional y la confianza a lo largo de la ejecución de este Proyecto.

A los ingenieros Jaime Alberto Loza, Alexander Martínez, Yair Quintero, Reinel Corzo, Yuliana Mejía y la Doctora Zuly calderón por sus aportes y contribución en la construcción de nuevos conocimientos.

A los Doctores Arlex Chávez y Viviana Sánchez por escuchar y atender todas mis dudas.

A la profe Paola Maradei por enseñarme que hay lecciones que van mucho más allá de un salón de clases.

A mis compañeros JuanK, Chiqui, Jorge con quienes he compartido gratas experiencias y siempre estuvieron dispuestos a resolver todas mis dudas y finalmente a todos mis compañeros del GIEP.

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	17
1.1. Hidratos de gas.....	17
1.2. Estabilidad de hidratos de gas .....	18
1.3. Perforación offshore.....	19
1.4. Desestabilización de hidratos de gas durante la perforación offshore .....	22
2. OBJETIVOS.....	24
2.1. Objetivo general.....	24
2.2. Objetivos específicos .....	24
3. METODOLOGÍA .....	25
3.1. Condiciones climáticas y de la formación. ....	25
3.2. Selección de las condiciones de Perforación Offshore .....	27
3.2.1. Plataforma.....	27
3.2.2. Cementación.....	27
3.2.3. Lodo de perforación .....	28
3.3. Desarrollo del Modelo Matemático.....	28
3.3.1. Planteamiento del Sistema de Perforación Offshore .....	29
3.3.2. Consideraciones .....	31
3.4. Balances de Energía.....	31
3.5. Comparación del Modelo Matemático.....	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
4.1. Perfiles de temperatura.....	35
4.2. Modelo matemático propuesto .....	35
4.3. Comparación del modelo matemático.....	41
4.3.1. Modelo propuesto en la literatura.....	41
4.3.2. Modelo simulado con wellcat .....	42
5. CONCLUSIONES .....	46
6. RECOMENDACIONES.....	47

7. BIBLIOGRAFIA.....	48
ANEXOS.....	51

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de moléculas de gas atrapadas en la red cristalina de agua. .	17
Figura 2. Diagramas de fase para hidratos de metano en ambientes marinos. ....	18
Figura 3. Metodología seguida en el presente trabajo. ....	25
Figura 4. Esquema representativo del caso de estudio empleado para el desarrollo del modelo matemático. ....	30
Figura 5. a) Perfil de temperatura inicial del pozo. b) Diagrama de estabilidad de hidratos de gas. ....	35
Figura 6. Modelo del pozo de perforación sin cementación. ....	36
Figura 7. Modelo del pozo de perforación con cementación. ....	37
Figura 8. Aportes de energía para el lodo A durante la perforación. ....	38
Figura 9. Aportes de energía para el lodo B durante la perforación. ....	39
Figura 10. Aportes de energía para el lodo A durante la cementación. ....	40
Figura 11. Aportes de energía para el lodo B durante la cementación. ....	40
Figura 12. Perfil de Temperatura del lodo durante el proceso de perforación propuesto por D. Stiles et all. ....	42
Figura 13. Modelo del pozo de perforación sin cementación simulado en Wellcat. ....	43
Figura 14. Modelo del pozo de perforación con cementación simulado en Wellcat. ....	44

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Típica composición de lechada de cemento empleada en zonas que contienen hidratos de gas. ....	27
Tabla 2. Composición del lodo de perforación empleado en zonas con presencia de hidratos de gas. ....	28
Tabla 3. Temperaturas [°C] de lodos de perforación en las interfases de interés para procesos sin cementación (perforación) y con cementación. ....	37
Tabla 4. Temperaturas [°C] de lodos de perforación en las interfases de interés para procesos de perforación (sin cementación) y con cementación obtenidas por simulación en Wellcat. ....	44

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Secuencia para la perforación .....	51
ANEXO B. Ventana de estabilidad para el peso del lodo .....	52
ANEXO C. Algoritmo del código .....	53
ANEXO D. Datos de la perforación para el modelado y el modelo matemático. ...	54

## RESUMEN

**TITULO: EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE HIDRATOS DURANTE LA PERFORACIÓN OFFSHORE \***

**AUTORES:** CARDENAS HERNANDEZ Yury Tatiana \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Hidratos de metano, BSR, perforación Offshore, curva de estabilidad, balances de energía.

**DESCRIPCIÓN:**

Las operaciones de perforación offshore se han convertido en un potencial de desarrollo para suplir la demanda energética a nivel mundial, sin embargo para generar nuevas soluciones hay que afrontar grandes desafíos; tales como los relacionados con la disociación de los hidratos de metano (compuestos naturales que se forman en el fondo marino, y son sensibles a cualquier cambio de presión y temperatura que afecte sus condiciones iniciales de formación), los cuales debido a su alta presión pueden ocasionar explosiones y en general riesgos relacionados con la estabilidad del pozo.

Por lo tanto esta investigación plantea un modelo matemático que permite construir el perfil de temperatura durante el proceso de perforación offshore en mantos que contienen hidratos de metano y de este modo determinar si la variación de temperatura afecta o no la estabilidad de los hidratos. Esto se llevó a cabo a través de una revisión bibliográfica que permitió definir los principales parámetros de perforación offshore, de igual manera la utilización de Scilab como herramienta de cómputo para la solución del modelo matemático planteado. Posteriormente se demostró la validez del modelo comparándolo con un software comercial que tiene en cuenta la geomecánica del pozo y la transferencia de calor durante la perforación, al igual que con los perfiles de temperatura reportados en la literatura.

Finalmente este estudio contribuye con un diagnóstico más completo de las consideraciones que se deben tener al perforar zonas que tengan hidratos de metano, lo que facilita el avance de operaciones seguras en actividades exploratorias en aguas ultraprofundas.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Dr. Fernando Viejo.

**SUMMARY**

**TITLE:** STABILITY ASSESSMENT OF HYDRATES DURING THE OFFSHORE DRILLING \*

**AUTHORS:** CARDENAS HERNANDEZ Yury Tatiana \*\*

**KEYWORDS:** Methane hydrates, BSR, Offshore drilling, stability curve, energy balances.

**ABSTRACT:**

The operations of offshore drilling have become a potential of development for supply the energy demand globally, however to generate new solutions have to face great challenges; such as the related with the dissociation of the methane hydrates (natural compounds that form on the seabed, and are sensitive to changes of pressure and temperature that affecting initial conditions of formation), which due to their high pressure can cause explosions and general risks related with the wellbore stability.

Therefore this investigation propose a mathematical model that allow build the temperature profile during the process of offshore drilling in mantles that contains methane hydrates and thus determine if the temperature variation affects or not the stability of the hydrates. This is conducted through a literature review that allowed defining the principal parameters of offshore drilling, similarly the use of scilab as a computational tool to the solution of the mathematical model proposed. Subsequently demonstrated the validity of the model comparing it whit a trade software that considers the geomechanics of the wellbore and the heat transfer during the drilling, as with the temperature profiles reported in the literature.

Finally this investigation contributes to a diagnostic most complete of the considerations that must be taken when drilling zones with methane hydrates, thus facilitating the advancement of safe operations in ultra-deep water exploration activities.

---

\* Graduation Project

\*\* Faculty of Physics-Chemical Engineerings. School of Chemical Engineering. Director Dr. Fernando Viejo

## NOMENCLATURA

$\dot{m}_A$  =Flujo másico del lodo A [kg/s]

$\dot{m}_B$  = Flujo másico del lodo B [kg/s]

$C_{pA}$  = Capacidad calorífica del lodo A [J/kg°C]

$C_{pB}$  = Capacidad calorífica del lodo B [J/kg°C]

$g$  = Gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$\Delta z$  =Diferencial de altura [m]

$U_A$  =Coeficiente de transferencia de calor del Lodo A [J/S°C]

$U_B$  = Coeficiente de transferencia de calor del Lodo B [J/S°C]

$Q_{A \rightarrow B}$  = Calor transferido del lodo A al lodo B [J/S]

$T_{Ai}$  = Temperatura para el lodo A en la superficie [°C]

$T_{A(i+1)}$  =Temperatura para el lodo A en la interfase [°C]

$T_{Ai} = T_{Bi}$  =Temperatura para el lodo en la salida de la broca [°C]

$T_{Aj}$  =Temperatura del lodo A para la convección-conducción radial [°C]

$Q_{B \rightarrow H_2O}$  =Calor transferido de lodo B al agua [J/S]

$T_{Bi}$  = Temperatura para el lodo B en la superficie [°C]

$T_{B(i+1)}$  = Temperatura para el lodo B en la interfase [°C]

$T_{Bj}$  = Temperatura del lodo B para la convección-conducción radial [°C]

$Q_{B \rightarrow A}$  =Calor transferido de B a A en la formación [J/s]

$Q_{B \rightarrow Form}$  =Calor transferido de B a la formación [J/s]

$h_A$  =Coeficiente de transferencia de calor del lodo A [W/m<sup>2</sup> °C]

$h_B$  = Coeficiente de transferencia de calor del lodo B [W/m<sup>2</sup> °C]

$K_{Dp}$  = Conductividad térmica del drill pipe [W/m °C]

$K_R$  = Conductividad térmica del riser [W/m °C]

$h_{H_2O}$  = Coeficiente de transferencia de calor del agua [W/m<sup>2</sup> °C]

$K_F$  = Conductividad térmica de la formación [W/m °C]

$K_{cs}$  = Conductividad térmica del casing [W/m °C]

$K_{cem}$  = Conductividad térmica del cemento [W/m °C]

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Bottom Hole Assembly (BHA):** Parte del conjunto de perforación seguida de la tubería de perforación. Puede ser muy sencillo cuando se compone de sólo la broca y los collares de perforación (Drill collars), o puede ser muy complejo y compuesto por varios componentes especiales.

**BRS:** (Bottom Simulating Reflector): se considera como un indicador de hidratos que generalmente se encuentran a aguas profundas y muestra la base de la zona de estabilización de hidratos.

**Casing:** tubo de acero que actúa como revestimiento para evitar que la pared del pozo se derrumbe y para ayudar en el control de pozos.

**Drill string:** tuberías de perforación con juntas de herramientas asociadas que transmite fluido y potencia de rotación. A menudo, el término se aplica libremente para incluir los tubos y collares de perforación.

**Formación no consolidada:** Rocas sedimentarias que se encuentran a profundidades someras y poseen un grado de compactación bajo.

**Influjo y patada de pozo:** Se presenta cuando los fluidos de la formación se vienen hacia el pozo y esto es debido a que la presión del lodo con el cual se está perforando es inferior a la presión de poro.

**Offshore:** significa alejado de la costa o mar adentro. Este calificativo se aplica a diferentes tipos de actividades de exploración y explotación petrolíferas que se realizan en alta mar.

**Presión o gradiente de fractura:** Presión necesaria para fracturar la formación.

**Presión de poro:** Presión a la cual se encuentran los fluidos que están dentro de los poros de la formación.

**Ripios** Recortes de perforación producidos por el movimiento rotacional de la broca al penetrar en la formación y generar un pozo.

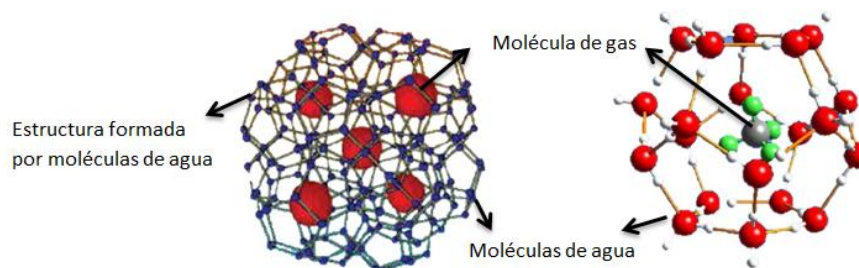
**Ventana de lodo:** Indica entre que rangos de densidades se puede perforar un pozo sin tener problemas de estabilidad como fracturas, influjos o patadas de gas.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Hidratos de gas

Actualmente, la gran demanda energética obliga a las compañías petroleras a estar en continuo desarrollo en cuanto a nuevas técnicas y escenarios de exploración de yacimientos. En este sentido, se habla de la perforación en el mar, en la cual surgen nuevos factores de riesgo que implican grandes retos y desafíos frente a operaciones en tierra. Algunos de estos factores de riesgo se encuentran relacionados con la disociación de hidratos de metano, compuestos naturales que se forman en el fondo marino a bajas temperaturas y elevadas presiones, y que son sensibles a cualquier tipo de cambio que afecte su estabilidad.

**Figura 1.** Esquema de moléculas de gas atrapadas en la red cristalina de agua.



**Fuente:** An introduction to natural gas hydrate/ clathrate: The major organic carbon reserve of the Earth (2007).

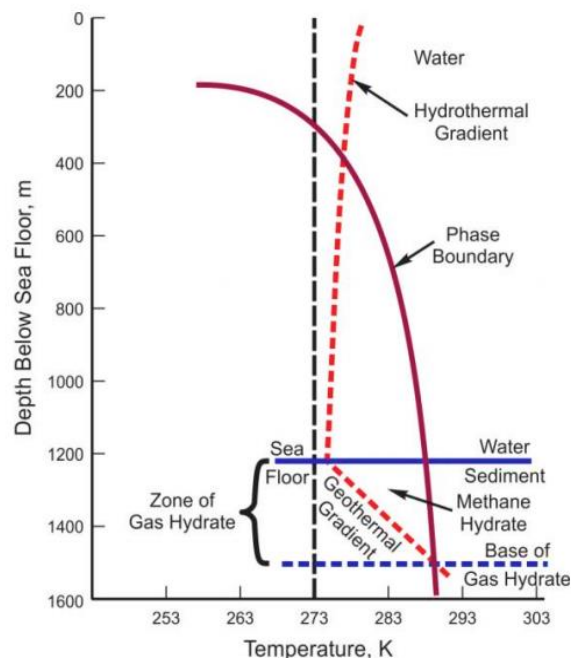
Los hidratos conocidos también como hidratos de gas, hidratos de metano o clatratos, presentan una estructura similar al hielo, cuya unidad básica es un cristal hueco de moléculas de agua dentro del cual se aloja una única molécula de gas flotando en el interior (Figura 1). Dichas moléculas de gas tienen su origen cuando bacterias anaeróbicas descomponen materia orgánica por debajo del fondo del mar, produciendo metano y otros subproductos gaseosos. Los cristales de hidrato se agrupan para formar un enrejado compacto de almacenamiento de gas, y

pueden aparecer en diversas formas tales como cemento disseminado, pequeños nódulos, vetas entre las capas de los sedimentos y en forma de hidratos masivos.

## 1.2. Estabilidad de hidratos de gas

La evidencia más generalizada de la presencia de acumulaciones de hidratos de gas marinos proviene de los análisis sísmicos y BRS, registros de pozo, y núcleos. A partir de estos análisis se ha podido conocer las condiciones de P y T que permiten a los hidratos de gas ser estables.

**Figura 2.** Diagramas de fase para hidratos de metano en ambientes marinos.



**Fuente:** Design Considerations for Isolating Gas-Hydrate-Bearing Zones in Deepwater Environments (2012).

Los hidratos de gas se forman cuando existen cantidades suficientes de agua y gas con la combinación correcta de temperatura y presión. Teóricamente, estos requerimientos de estabilidad se cumplen en el fondo del mar. Fuera de esta zona

de estabilidad, los hidratos se disocian en sus componentes agua y gas. Los límites de presión y temperatura a los que existen los hidratos se rigen por las curvas de estabilidad del hidrato de gas o límites de fase. Debido a que la presión aumenta con la profundidad debajo de la superficie de la tierra o el océano, la profundidad sirve como un indicador de presión en los diagramas de fase de los hidratos.

En este sentido, la Figura 2 muestra el diagrama de fases de hidratos de gas en fondos marinos. La línea punteada muestra el perfil de temperatura del agua de mar (columna de agua) en función de la profundidad, y que disminuye gradualmente hasta alcanzar los 1200 metros. A partir de dicha profundidad, existe un aumento de la misma asociado al gradiente geotérmico. Por otro lado, la línea azul representa la región de formación saturada de hidratos de metano, mientras que la línea continua indica la curva de estabilidad para los hidratos.

El espesor de la zona de estabilidad del hidrato de gas varía con la temperatura, presión y composición, además de las condiciones geológicas y la profundidad del agua. Es por ello que la cantidad y distribución de hidratos de gas dentro de una zona de estabilidad puede variar en diferentes lugares de manera significativa. Sin embargo, se ha podido determinar que el rango de profundidad típico donde se originan las zonas de estabilidad de los hidratos se encuentra entre 100 y 500 metros por debajo del lecho marino y cubren extensiones verticales de varios metros y grandes áreas horizontales.

### **1.3. Perforación offshore**

Hasta la fecha, se han perforado sedimentos de hidratos de gas sin mayores problemas en numerosos lugares en las costas de Canadá, el Ártico de Alaska y el Golfo de México. En Colombia, de acuerdo con un estudio realizado por Geoexplorers International, se han postulado dos áreas con presencia importante

de hidratos de gas, la cuenca Colombiana en el Mar Caribe y la cuenca de Panamá en el Océano Pacífico, con reservas estimadas que superan los 120 y 300 trillones americanos de pies cúbicos (TCF) de gas, respectivamente.

En la puesta en marcha de una operación de perforación offshore existe un amplio espectro de factores a considerar, tales como la profundidad del agua, el clima, las corrientes marinas, formación de hidratos y, en general, las condiciones del lecho marino, ya que de ello dependen ciertas restricciones para seleccionar el equipo de perforación, además de las habilidades y pericias para sortear los diferentes problemas que se puedan presentar.

En primer lugar, es importante conocer qué épocas del año son las más favorables, así como las más críticas climáticamente para ejecutar dicho proceso. Con las condiciones climáticas definidas se seleccionan el tipo de plataforma de perforación que sirve de base para que los operarios acoplen y desacoplen las secciones de tubería de perforación que se utilizan para aumentar las profundidades del pozo. El tipo de plataforma utilizado en la perforación submarina suele estar determinado por la clase de pozo que se va a perforar, la profundidad del agua, factores climáticos, condiciones del mar y problemas logísticos de abastecimiento y servicios.

El proceso de perforación se lleva a cabo mediante el movimiento rotacional de una broca unida a una sarta de perforación, que está conformada por un BHA que trabaja a compresión suministrando el peso a la broca para poder avanzar, y el “drill pipe” que trabaja a tensión y es la tubería que se incorpora a medida que aumenta la profundidad del pozo (Anexo A). Durante este proceso es necesario mantener un fluido circulando, encargado de sostener las paredes del pozo, lubricar la broca, llevar los ripios a superficie, entre otros. En operaciones de perforación offshore se utiliza un “riser”, que es la tubería ascendente que proporciona un conducto para operar la tubería de perforación y demás herramientas al interior del pozo y evitar la comunicación de los fluidos del pozo

con el medio marino. Un riser marino debe ser diseñado de tal forma que resista con seguridad los efectos de oleaje, mareas, fuertes corrientes, que crean fuerzas significativas y algunas veces vibración.

Cuando ya se ha alcanzado una determinada profundidad, es necesario darle estabilidad al pozo a través de la cementación, para lo cual es necesario emplear un tipo de tubería diferente, conocida como “casing”, que funciona como revestimiento del pozo. La cementación en aguas profundas se vuelve cada vez más difícil cuando las operaciones de perforación se hacen a mayores profundidades, debido a dos problemas fundamentales: el bajo gradiente de fractura de la formación y la menor temperatura del medio.

El gradiente de fractura se define como la presión necesaria para fracturar una formación. En la mayoría de regiones de aguas profundas, el fondo del mar se compone de una formación no consolidada, de tal forma que su gradiente de fractura es inferior a la de los pozos perforados en tierra. Esto ocurre como resultado de una presión de sobrecarga más baja debido a la profundidad de agua y al intervalo de aire. Es por ello, que el riesgo de pérdidas durante o después de la cementación es elevada debido al estrecho margen entre la presión a la que se encuentran los fluidos en la formación (presión de poro) y el gradiente de fractura de dicha formación.

Para poder diseñar pozos seguros se requiere perforar un hueco hidráulicamente estable, por lo que se debe mantener el peso del lodo de perforación dentro del margen entre el gradiente de fractura y la presión de poro (Anexo B).

Así mismo, la profundidad del agua tiene un efecto significativo sobre la cementación. Las bajas temperaturas del fondo marino afectan a las operaciones de cementación, incrementando el tiempo necesario para lograr la resistencia a la compresión requerida y haciendo que el cemento sea cada vez más viscoso.

Por otro lado, es importante seleccionar de forma adecuada la composición química y las propiedades del lodo de perforación con objeto de proporcionar un pozo estable y seguro hasta que se pueda introducir y cementar la tubería de revestimiento. Típicamente se usan varios tipos de sistemas de lodo de perforación en cada pozo. Los sistemas de agua de mar y agua salobre son usados en las operaciones de perforación costa fuera y costaneras debido a las provisiones inagotables de ese tipo de agua en el sitio de perforación. Además, las arcillas perforadas se hidratan menos que cuando se usa agua dulce. En la actualidad, la industria de lodos de perforación ha diseñado diferentes clases de lodos, base agua, base aceite y sintéticos, con diferentes aditivos químicos, que permiten mantener estas condiciones de estabilidad. En el caso particular de perforación de mantos con hidratos de metano se emplean inhibidores para reducir la temperatura de formación de hidratos. Entre los aditivos más comunes se destacan el cloruro de sodio y los glicoles de bajo peso molecular.

#### **1.4. Desestabilización de hidratos de gas durante la perforación offshore**

Los hidratos de gas pueden plantear riesgos para las operaciones de perforación en el mar, afectando la estabilidad del fondo marino y almacenando o liberando gases de efecto invernadero. La elevada presión de la estructura del hidrato de gas y las bajas temperaturas contribuyen a la eficaz compactación del metano. Sin embargo, los aumentos de temperatura y las caídas de presión que afecten a la zona de estabilidad del hidrato de gas pueden desestabilizar los hidratos. Como dato, un volumen cúbico de hidrato de gas contiene metano que se expandirá entre 150 y 180 volúmenes cúbicos a presión y temperatura estándar.

Para los operadores que perforan en aguas profundas, el encuentro de hidratos de gas puede ocasionar problemas de estabilidad en el pozo tales como explosiones, patadas de pozo o gasificación del lodo, en particular si grandes cantidades de hidratos entran en el hueco y se despresurizan. Cuando los cristales de hidrato se

disocian cambian las propiedades mecánicas de los sedimentos. McIver fue uno de los primeros autores en investigar acerca de la posible relación entre la estabilidad de los hidratos de gas y fallas en los taludes submarinos. En su modelo conceptual, propone que los hidratos de gas juegan un papel de agente cementante entre granos de sedimentos, y que el exceso de la presión de poro generada por su disociación y la disminución de la resistencia mecánica de los sedimentos son dos factores claves en el derrumbe de taludes submarinos y, por tanto, en la estabilidad del pozo.

El factor más crítico quizá en la estabilidad de los hidratos de gas durante el proceso de perforación es la temperatura. En este sentido, tanto la circulación de lodo caliente dentro del hueco, como el calor liberado durante la solidificación del cemento, pueden aumentar la temperatura en el área circundante, conduciendo a la disociación de los hidratos de gas y a la desestabilización de los sedimentos que sostienen el pozo. Es de aclarar que los datos de temperatura no sólo se requieren para determinar la estabilidad de hidratos, también se utilizan para el diseño adecuado de cemento, mantener la densidad y la viscosidad del lodo apropiada y conocer ambientes corrosivos.

En la actualidad, uno de los parámetros críticos en el diseño del pozo y que afecta la estabilidad de los hidratos de gas es la velocidad a la cual se libera el calor de hidratación durante el proceso de cementación para fijar el casing. Éste dependerá de la cantidad de material reactivo por volumen de lechada y los aditivos empleados, por lo que se busca formulaciones de cemento que proporcionen alta resistencia, buena adherencia, tiempos de endurecimiento cortos y bajo calor de hidratación. Por otro lado, el flujo de disipación de calor será clave en el proceso y a su vez dependerá de la geometría del pozo, el tipo de lodo de perforación empleado y las propiedades térmicas de la formación.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Evaluar la estabilidad de los hidratos de gas durante la perforación offshore a partir del análisis de la variación de temperatura del lodo empleado durante dicho proceso, y desarrollar un modelo matemático que permita identificar alternativas que eviten su disociación.

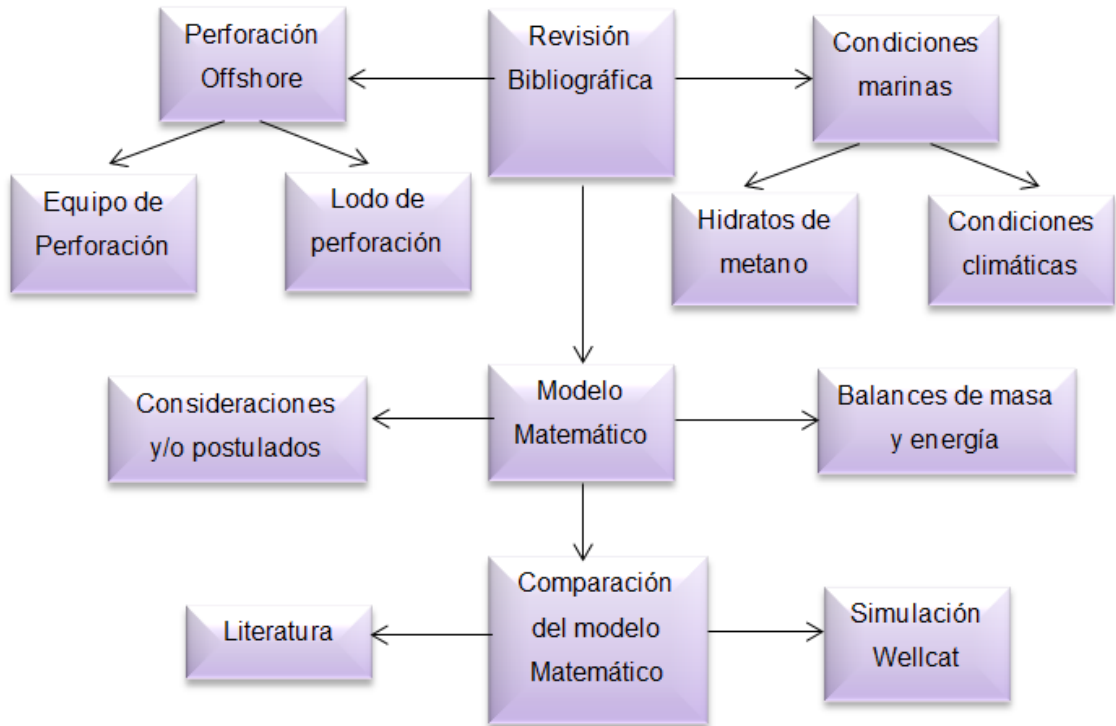
### **2.2. Objetivos específicos**

- Analizar y seleccionar la información necesaria para definir los principales parámetros del equipo de perforación offshore, y el tipo de lodo que provea las condiciones óptimas para la estabilidad de hidratos de gas.
- Identificar la influencia de las condiciones climáticas y las corrientes marinas en diferentes épocas del año al igual que los riesgos en operaciones de perforación offshore relacionados con la inestabilidad de hidratos.
- Proponer un modelo matemático empleando la ecuación de transferencia de calor para evaluar el gradiente temperatura en la zona de ocurrencia de hidratos de gas a fin de determinar su estabilidad durante la perforación offshore.
- Comparar los resultados obtenidos a partir del modelo propuesto con un simulador comercial.

### 3. METODOLOGÍA

En la Figura 3 se muestra el diagrama esquemático de la metodología seguida en el presente proyecto.

**Figura 3.** Metodología seguida en el presente trabajo.



**Fuente:** Autor

#### 3.1. Condiciones climáticas y de la formación.

El área de estudio del presente proyecto se localiza en el Caribe Colombiano, región que constituye parte de la esquina noroccidental de Suramérica, con una extensión de 950.000 hectáreas dentro del Mar Caribe colombiano frente a los departamentos de Antioquía, Córdoba, Sucre y Bolívar, y cuya profundidad oscila entre 50 y 2.700 metros. En esta área se identifican dos períodos climáticos principales, llamados Época Seca (verano) que va desde los meses de Diciembre

a Marzo, y Época Húmeda (invierno) que transcurre desde Abril hasta Noviembre, con una Época de Transición desde la segunda quincena del mes de Mayo hasta Julio.

Para el estudio de la variación del clima en el Caribe Colombiano, el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe a través del Área de Oceanografía Operacional, realiza una descripción mensual del comportamiento de los diferentes parámetros meteorológicos y oceánicos que definen el comportamiento climático de la región Caribe. Para cumplir con este propósito la Dirección General Marítima tiene un Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y Meteorológico, que está conformado por estaciones meteorológicas satelitales, boyas de oleaje direccional y mareógrafos, ubicados en varios lugares de la costa Caribe y Pacífica. Para la adquisición de los datos de velocidad y dirección de las corrientes marinas se contó con un modelo oceanográfico de aguas profundas del Caribe, suministrado por el oceanógrafo Doctor Efraín Rubio del ICP. Se debe resaltar que dicho modelo se encuentra en la actualidad en proceso de validación.

El perfil de temperatura del agua se construyó a partir de los datos reportados para el mes de Julio por ser el mes con más variaciones en cuanto a temperatura y velocidad de las corrientes. Para hallar la temperatura de la formación se empleó un gradiente geotérmico de  $0,032^{\circ}\text{C}/\text{m}$ . La zona que contenía hidratos se identificó a través de un estudio de sismica suministrado por el ICP.

## 3.2. Selección de las condiciones de Perforación Offshore

### 3.2.1. Plataforma

Se recomienda utilizar una plataforma semi-sumergible, que es diseñada como una solución para minimizar los movimientos verticales generados por el fuerte oleaje, con una altura promedio de ola mayor a 8 pies. Para la Costa Caribe los valores de altura promedio de ola están entre 6,6 y 8,20 pies de acuerdo con el trabajo realizado por Yves-François Thomas (2011).

### 3.2.2. Cementación

De acuerdo con la literatura al cementar zonas que contienen hidratos de metano se debe especificar la composición para la lechada mostrada en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Típica composición de lechada de cemento empleada en zonas que contienen hidratos de gas.

Función	Típica Concentración (%En peso de la mezcla)
Cemento clase C	50 a 60
Cemento de alta resistencia temprana	10 a 15
Aditivo bajo-HOH	2 a 7
Reductor de conductividad termica	3 a 8
Aditivo ligero	Según sea necesario
Sal	2 a 5
Baja temperatura Acelerador/Retardador	Según sea necesario
Dispersante	0,1 a 0,4
Aditivo anti-migración del gas	0,4 a 1
Propiedad mecanica potencializador	3 a 8
Material perdida de circulación	5 a 10
Antiespumante[gal/sk]	0,02 a 0,05
Aguagal/sk]	6 a 9

**Fuente:** Design Considerations for Isolating Gas-Hydrate-Bearing Zones in Deepwater Environments. (2012)

### 3.2.3. Lodo de perforación

De acuerdo con la literatura la composición de lodo de perforación más adecuada para su empleo en zonas que contienen hidratos de metano se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2.** Composición del lodo de perforación empleado en zonas con presencia de hidratos de gas.

Función	Tipica Concentración(kg/m <sup>3</sup> )
Salmuera	Menos del 10%
Viscosificador	0,7 a 3
Viscosificador/Filtación de control	3 a 14
Agente de control de filtración	6 a 29
Ponderación/Agente puente	Según sea necesario
Alcalinidad	0,3 a 9

**Fuente:** Design Considerations for Isolating Gas-Hydrate-Bearing Zones in Deepwater Environments. (2012)

### 3.3. Desarrollo del Modelo Matemático

El modelo matemático permite llevar a cabo un análisis detallado del perfil de temperatura durante la perforación ya que hace su estudio metro a metro. Está diseñado para calcular la temperatura de entrada y salida del lodo evitando la disociación de los hidratos, ya que se establece una temperatura a la salida de la broca que favorece su estabilidad, manteniendo la condición de que la temperatura del lodo que desciende por la sarta de perforación (lodo A, TA) es equivalente a la temperatura del lodo que asciende por el espacio anular (lodo B,

TB). A partir de este supuesto se desarrolla el balance de energía hasta superficie teniendo en cuenta la formación y la columna de agua. El modelo, además, incluye un análisis para la temperatura del lodo concluida la cementación, es decir que no tiene en cuenta el tiempo de secado del cemento. La solución numérica del modelo se hizo mediante un código creado en scilab. (Anexo C)

### **3.3.1. Planteamiento del Sistema de Perforación Offshore**

Para el desarrollo del modelo matemático se planteó un sistema de perforación de un pozo offshore con una columna de agua considerada  $L_1$  en la que se tuvo en cuenta la variación de la temperatura en función de la profundidad del mar, seguida de una zona que contiene hidratos,  $L_2$ . Para el análisis de transferencia de calor se consideró que el lodo de perforación desciende por la sarta (lodo A) y asciende por el anular (lodo B) y la formación (ver Figura 4).

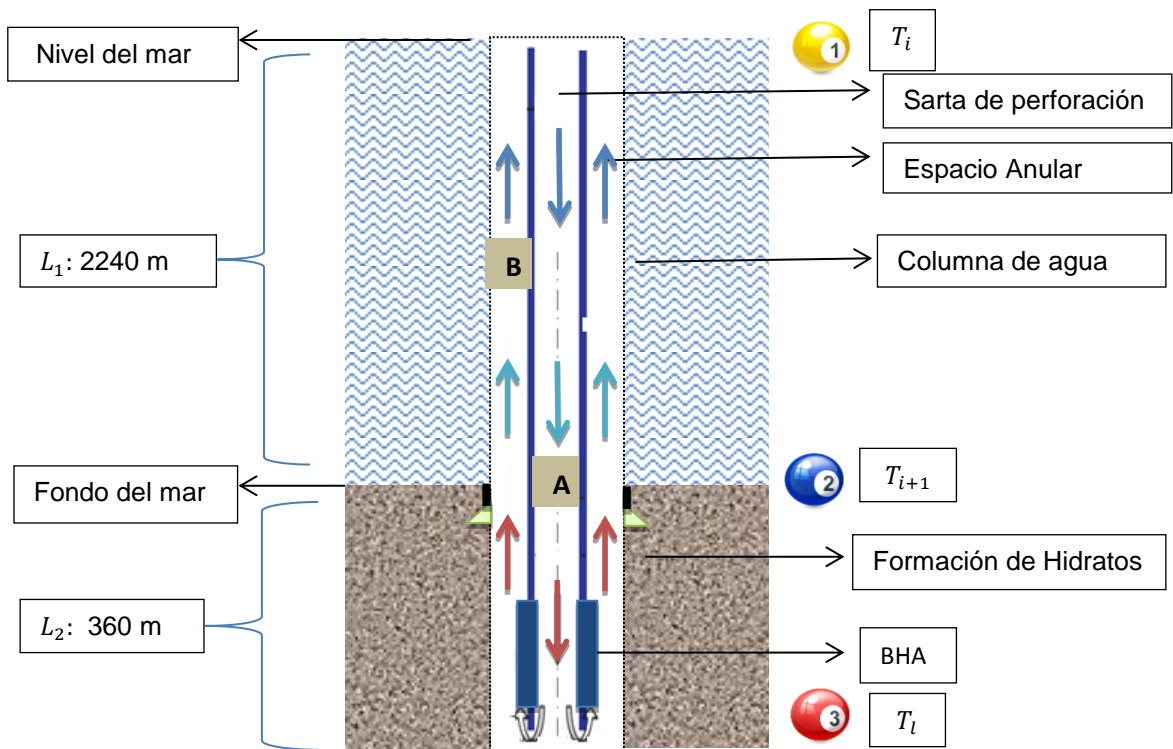
Para resolver el sistema de ecuaciones fue necesario obtener algunos datos iniciales relacionados con las propiedades del lodo, del mar, la formación y las tuberías empleadas (Anexo D). Posteriormente, se asignaron ecuaciones de variación de temperatura para cuatro áreas de trabajo diferentes distribuidas de la siguiente manera:

**Área I:** correspondiente a la transferencia de calor del lodo que desciende por la sarta de perforación (lodo A) hasta el fondo del mar, teniendo en cuenta que su condición de frontera será la variación de la temperatura de lodo que asciende por el anular (lodo B). (Sección 1-2).

**Área II:** correspondiente a la transferencia de calor del lodo que desciende por la sarta de perforación (Lodo A) desde el fondo del mar, hasta la profundidad total de la formación de hidratos (Sección 2-3), teniendo en cuenta que su condición de

frontera será la variación de la temperatura del lodo que asciende por el anular (Lodo B)

**Figura 4.** Esquema representativo del caso de estudio empleado para el desarrollo del modelo matemático.



**Fuente:** Autor

**Área III:** correspondiente a la transferencia de calor del lodo que asciende por el espacio anular (lodo B) desde la profundidad total de la formación de hidratos hasta el fondo del mar (Sección 3-2), teniendo en cuenta que su condición de frontera será la variación de la temperatura de la formación (Figura 5a) y la temperatura del lodo que desciende por la sarta de perforación (Lodo A). En esta sección se evaluó la transferencia tanto en la formación con cemento y sin cemento.

**Área IV:** Correspondiente a la transferencia de calor del lodo que asciende por el espacio anular (Lodo B) hasta el nivel del mar, teniendo en cuenta que su condición de frontera será la variación de la temperatura del mar (Figura 5a) y la temperatura del lodo que desciende por la sarta de perforación (Lodo A).

### **3.3.2. Consideraciones**

Para desarrollar el modelo matemático se partió de un balance de energía donde se tuvieron varias condiciones teóricas de trabajo. En este sentido, se consideró que el pozo es vertical y trabaja en estado estacionario; no hay pérdidas de circulación de lodo en el pozo, es decir todo el lodo que entra al pozo sale a superficie; por lo tanto el término de acumulación se hace cero; el lodo es un fluido incompresible cuya velocidad y presión del lodo se mantienen constantes durante la perforación; por tal motivo al no haber un  $\Delta$  de velocidad la energía cinética del lodo es cero; la conducción axial es despreciable comparada con la convección axial; en este sentido se analiza la convección axial del lodo como la energía interna asociada por el movimiento global del fluido; los valores de densidad,  $C_p$ ,  $h$  y  $k$  se mantienen constantes ya que no se tienen cambios de fase en el lodo; y el calor transferido de forma radial,  $(Q)$ , es análogo a la resistencia eléctrica.

### **3.4. Balances de Energía**

A continuación se muestran las ecuaciones de balance de energía de los lodos A y B tanto en el agua como en la formación con y sin cemento (la nomenclatura empleada en dichas ecuaciones se encuentra indicada en la sección "Nomenclatura" al inicio del trabajo). El término de convección relaciona la salida menos la entrada teniendo en cuenta el cambio de dirección de fluido y que la columna de agua actúa como un refrigerante y la formación al contrario aumenta su temperatura en función de la profundidad.

## Balances de Energía en el Agua

Lodo A

$$-\dot{m}_A * \dot{C}_{pA} * (T_{Ai} - T_{A(i+1)}) + g * \dot{m}_A * \Delta Z - Q_{A \rightarrow B} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{m}_A * \dot{C}_{pA} * (T_{A(i+1)} - T_{Ai}) + g * \dot{m}_A * \Delta Z - U_A * (T_{Aj} - T_{Bj}) = 0$$

$$U_A = \frac{1}{\frac{1}{h_A * 2 * \pi * r_1 * l} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{K_{Dp} * 2 * \pi * l} + \frac{1}{h_B * 2 * \pi * r_2 * l}}$$

$$T_{Ai} = T_{A(i+1)} + \frac{g * \Delta Z}{C_{pA}} - \frac{U_A * (T_{Aj} - T_{Bj})}{\dot{m}_A * C_{pA}} \quad (2)$$

Lodo B

$$Q_{A \rightarrow B} - Q_{B \rightarrow H_2O} - \dot{m}_B * \dot{C}_{pB} * (T_{B(i+1)} - T_{Bi}) - g * \dot{m}_B * \Delta Z = 0 \quad (3)$$

$$U_A * (T_{Aj} - T_{Bj}) - U_B * (T_{Bj} - T_{H_2Oj}) + \dot{m}_B * \dot{C}_{pB} * (T_{Bi} - T_{B(i+1)}) - g * \dot{m}_B * \Delta Z = 0$$

$$U_B = \frac{1}{\frac{1}{h_B * 2 * \pi * r_3 * l} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{K_R * 2 * \pi * l} + \frac{1}{h_{H_2O} * 2 * \pi * r_4 * l}}$$

$$T_{Bi} = T_{B(i+1)} + \frac{g * \Delta Z}{C_{pB}} + \left[ \frac{U_B * (T_{Bj} - T_{H_2Oj}) - U_A * (T_{Aj} - T_{Bj})}{\dot{m}_B * C_{pB}} \right] \quad (4)$$

## Balances en la Formación

Lodo A

$$Q_{B \rightarrow A} + \dot{m}_A * \dot{C}_{pA} * (T_{A(i+1)} - T_{Ai}) + g * \dot{m}_A * \Delta Z = 0 \quad (5)$$

$$U_A * (T_{Aj} - T_{Bj}) + \dot{m}_A * \dot{C}_{pA} * (T_{A(i+1)} - T_{Ai}) + g * \dot{m}_A * \Delta Z = 0$$

$$U_A = \frac{1}{\frac{1}{h_A * 2 * \pi * r_1 * l} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{K_{Dp} * 2 * \pi * l} + \frac{1}{h_B * 2 * \pi * r_2 * l}}$$

$$T_{A(i+1)} = T_{Al} - \frac{g * \Delta Z}{C_{pA}} - \frac{U_A * (T_{Aj} - T_{Bj})}{\dot{m}_A * C_{pA}} \quad (6)$$

Lodo B (formación sin cemento)

$$-Q_{B \rightarrow A} - Q_{B \rightarrow Form} + \dot{m}_B * C_{pB} * (T_{Bl} - T_{B(i+1)}) - g * \dot{m}_B * \Delta Z = 0 \quad (7)$$

$$-U_A * (T_{Aj} - T_{Bj}) - U_B * (T_{Bj} - T_{Fj}) + \dot{m}_B * C_{pB} * (T_{Bl} - T_{B(i+1)}) - g * \dot{m}_B * \Delta Z = 0$$

$$U_B = \frac{1}{\frac{1}{h_B * 2 * \pi * r_3 * l} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{K_F * 2 * \pi * l}}$$

$$T_{B(i+1)} = T_{Bl} - \frac{g * \Delta Z}{C_{pB}} - \left[ \frac{U_B * (T_{Bj} - T_{Fj}) + U_A * (T_{Aj} - T_{Bj})}{\dot{m}_B * C_{pB}} \right] \quad (8)$$

$$T_{iB} = T_B + \Delta T_{Broca} ; \Delta T_{Broca} = 0,3^\circ C$$

Lodo B (formación con cemento)

$$-Q_{B \rightarrow A} - Q_{B \rightarrow Form} + \dot{m}_B * C_{pB} * (T_{Bl} - T_{B(i+1)}) - g * \dot{m}_B * \Delta Z = 0 \quad (9)$$

$$-U_A * (T_{Aj} - T_{Bj}) - U_B * (T_{Bj} - T_{Fj}) + \dot{m}_B * C_{pB} * (T_{Bl} - T_{B(i+1)}) - g * \dot{m}_B * \Delta Z = 0$$

$$U_B = \frac{1}{\frac{1}{h_B * 2 * \pi * r_3 * l} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{K_{cs} * 2 * \pi * l} + \frac{\ln(r_5/r_4)}{K_{cem} * 2 * \pi * l} + \frac{\ln(r_6/r_5)}{K_F * 2 * \pi * l}}$$

$$T_{B(i+1)} = T_{Bl} - \frac{g * \Delta Z}{C_{pB}} - \left[ \frac{U_B * (T_{Bj} - T_{Fj}) + U_A * (T_{Aj} - T_{Bj})}{\dot{m}_B * C_{pB}} \right] \quad (10)$$

### **3.5. Comparación del Modelo Matemático**

Por último, una vez determinado el modelo de temperatura para el lodo de perforación, los resultados obtenidos fueron comparados con los modelos propuestos en la literatura y con los obtenidos mediante el simulador WellCat realizados en el ICP.

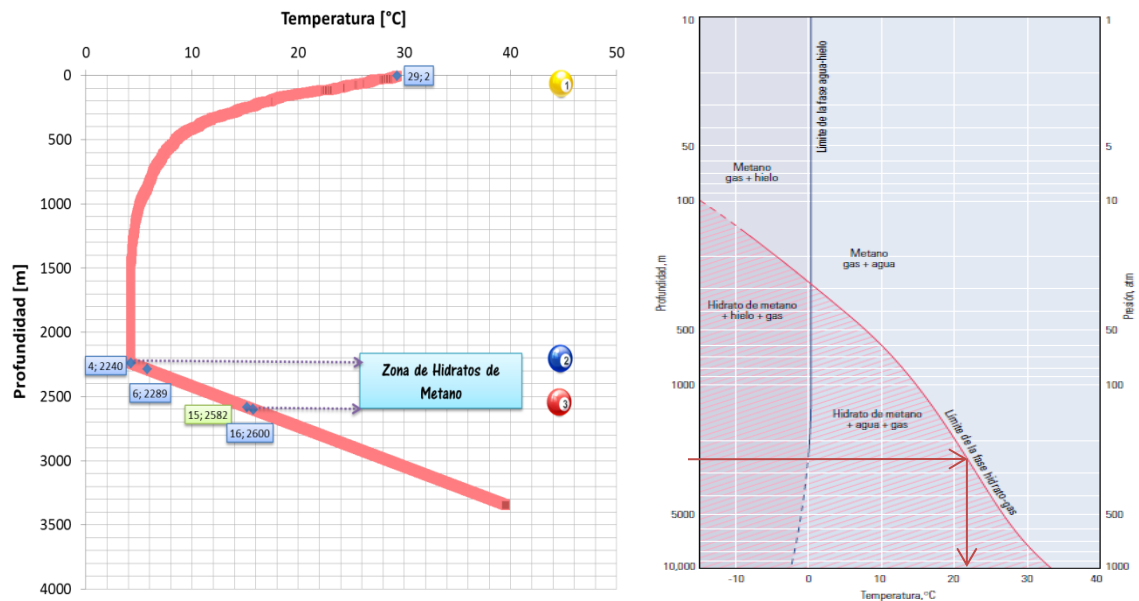
Cabe resaltar que los perfiles que se encuentran en la literatura no se pueden comparar numéricamente con los obtenidos en el modelo matemático propuesto, esto debido a que no se encuentran estudios para pozos perforados con una columna de agua de 2240m. No obstante dichos perfiles se estudiaron para analizar el comportamiento del lodo tanto en la columna de agua como en la formación.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Perfiles de temperatura

La sección 1-2 de la Figura 5 a) muestra el perfil de temperatura inicial para la columna de agua hasta los 2240m. La sección 2-3 de la Figura 5 a) muestra el aumento de temperatura en la formación debido al gradiente geotérmico, donde se identifica la zona de hidratos a una profundidad de 2600m. En la Figura 5 b) el diagrama de estabilidad de los hidratos indica que a una profundidad de 2600m los hidratos se mantendrán estables a temperaturas inferiores a 23°C.

**Figura 5.** a) Perfil de temperatura inicial del pozo. b) Diagrama de estabilidad de hidratos de gas.



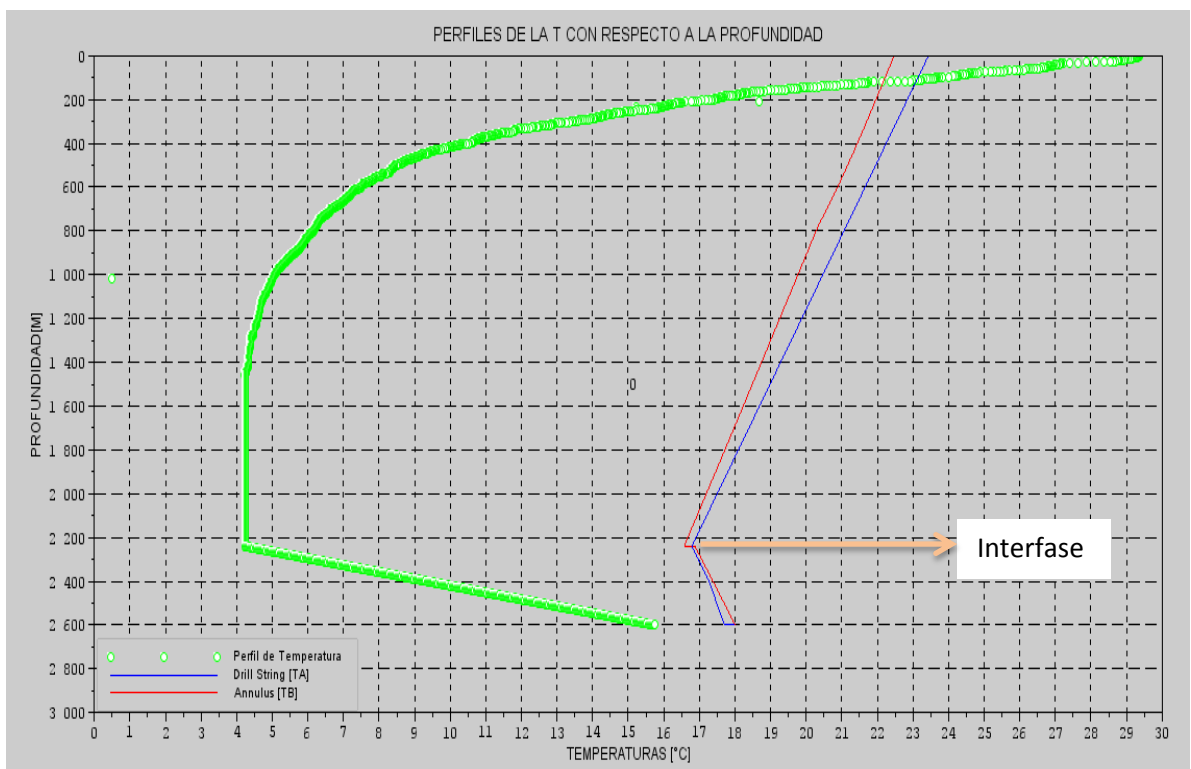
**Fuente:** a) Autor b) El creciente interés en los hidratos de gas (2000).

### 4.2. Modelo matemático propuesto

En las Figuras 6 y 7 se muestran los perfiles de temperatura de los pozos sin y con cementación. Se puede observar que en la sección de la columna de agua (0 a 2240m), el lodo A (drill string) presenta mayor temperatura que el lodo B

(Anular). A su vez ambos lodos presentan temperatura mayor que el perfil de la columna de agua (Línea verde), por lo que esta última actúa como un refrigerante. Por otro lado, en la parte de la formación (2240-2600m), el lodo B experimenta un aumento de temperatura debido a la rotación de la broca y el gradiente geotérmico, de tal forma que ahora su temperatura es mayor que la correspondiente al lodo A. El punto donde la temperatura de ambos fluidos se hace equivalente corresponde al punto de salida de la broca (2600m).

**Figura 6.** Modelo del pozo de perforación sin cementación.

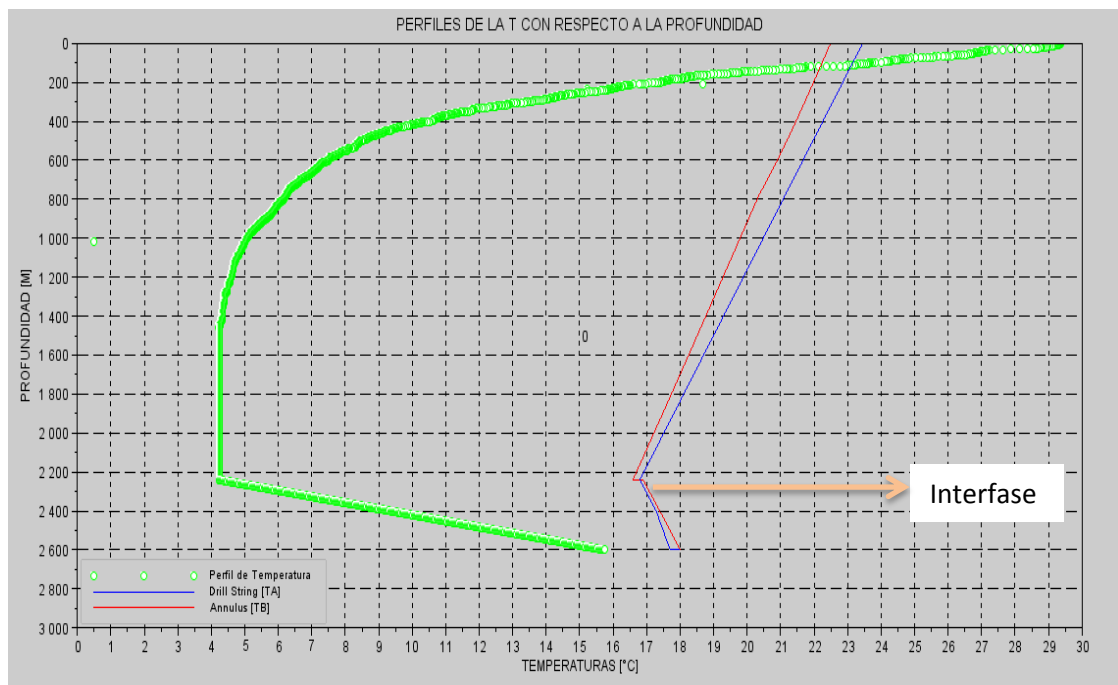


**Fuente:** Autor

Así mismo, se aprecia que durante el paso por la columna de agua hasta 2240m, el lodo de perforación se enfría 6,6°C de temperatura, y para la sección que contiene hidratos se llega a una temperatura máxima de 18°C evitando la disociación de los hidratos.

En la Tabla 3 se muestran las temperaturas de los lodos A y B determinados mediante el modelo para cada una de las interfaces de interés tanto sin como con cementación. En el segundo caso (con cemento) se analizó el cemento como una resistencia de energía, considerando que éste ya se había secado. Sin embargo, se puede observar que el perfil de temperatura en ambos casos es el mismo ya que la zona de hidratos, donde se lleva a cabo la cementación, es muy pequeña en comparación con la longitud de la columna de agua, por lo tanto, la transferencia de calor no muestra variación significativa.

**Figura 7.** Modelo del pozo de perforación con cementación.



**Fuente:** Autor

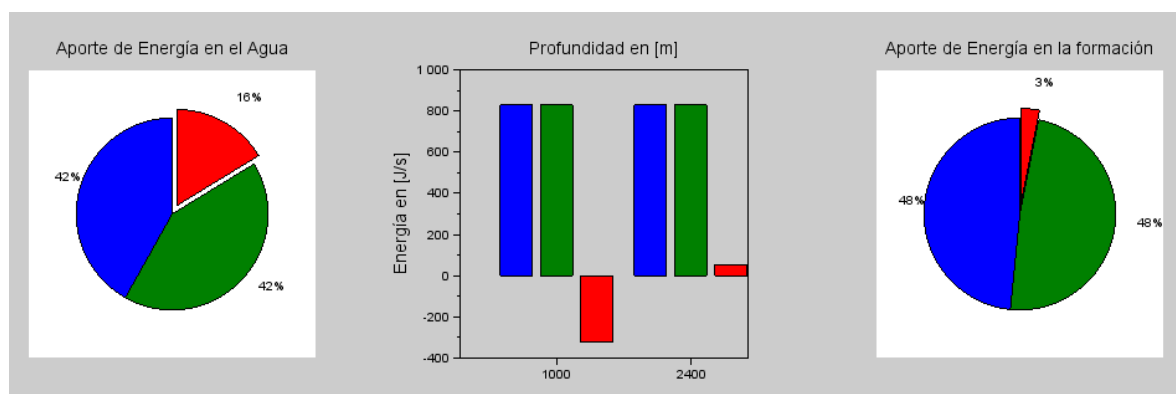
**Tabla 3.** Temperaturas [°C] de lodos de perforación en las interfaces de interés para procesos sin cementación (perforación) y con cementación.

T[°C]	Entrada 0[m]	Interfase 2234[m]	Interfase 2241[m]	Interfase 2247[m]	Final 2245 [m]	Final 2600[m]
<b>Sin cementación</b>						
<b>Lodo A</b>	23,25	16,65	16,65	16,65	16,65	17,85
<b>Lodo B</b>	22,35	16,45	16,75	16,75	16,75	17,85
<b>Con cementación</b>						
<b>Lodo A</b>	23,25	16,65	16,65	16,65	16,65	17,85
<b>Lodo B</b>	22,35	16,45	16,75	16,75	16,75	17,85

**Fuente:** Autor

En las Figuras 8 y 9 se muestra el análisis estadístico, en forma de gráfica de pastel e histograma, de los porcentajes de transferencia (pérdida o ganancia) de cada una de las energías involucradas (energía potencial en azul, convección axial en verde, conducción-convección radial del lodo drill pipe y el anular en rojo, y conducción-convección radial entre el lodo del anular y el agua/formación en azul claro) en el proceso de perforación (sin cementación) en función de la profundidad y la sección de intercambio, columna de agua (realizado a 1000m) y formación (realizado a 2400m), para cada uno de los lodos de perforación.

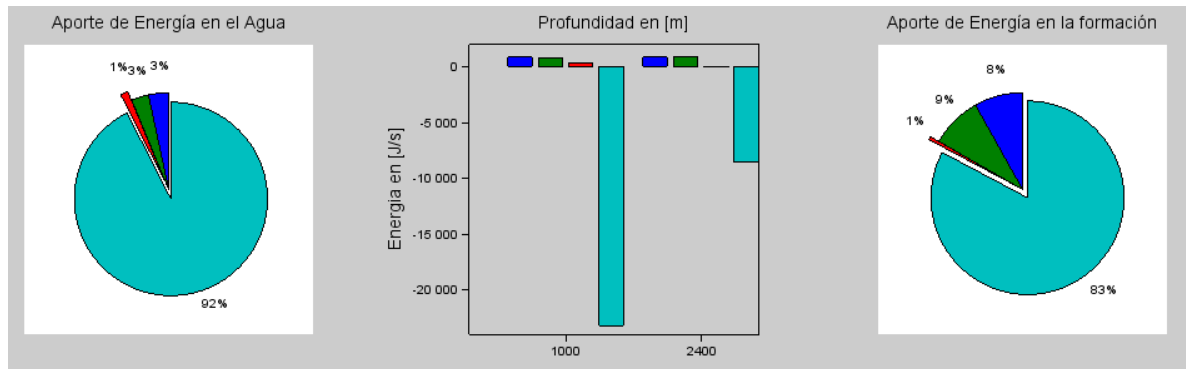
**Figura 8.** Aportes de energía para el lodo A durante la perforación.



Energía potencial — Convección axial — Conducción-convección radial —

**Fuente:** Autor

**Figura 9.** Aportes de energía para el lodo B durante la perforación.



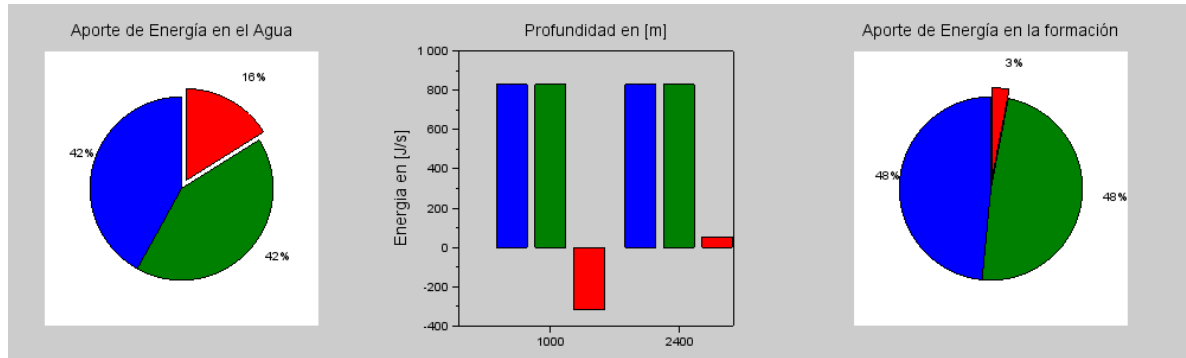
Energía potencial ■ Convección axial ■ Conducción-convección radial ■

**Fuente:** Autor

Se puede apreciar que los términos con mayor influencia para el lodo A durante su descenso por la columna agua son la energía potencial y el término de convección, con un bajo porcentaje de pérdida de calor radial asociada al lodo que asciende por el anular (lodo B). Al llegar a la formación el lodo A recibe calor del lodo B, y la energía potencial y el término de convección siguen manteniendo una mayor influencia. Con respecto al lodo B, se puede observar que las mayores pérdidas de energía son debidas al enfriamiento del lodo en la columna de agua, y que los aportes de energías provenientes de la energía potencial y la convección son relativamente pequeños al igual que la transferencia entre ambos lodos. En la formación, la mayor transferencia se da por el contacto entre el lodo y la formación, que es calentada por el efecto de la rotación de la broca.

Por otro lado, en las Figuras 10 y 11 se muestra el respectivo análisis estadístico para condiciones en las que existe cementación. En este caso, el lodo que desciende (lodo A) mantiene el mismo comportamiento que el descrito por el lodo durante la perforación en cuanto aportes de energía para el lodo, es decir, que no se ve afectado durante la cementación.

**Figura 10.** Aportes de energía para el lodo A durante la cementación.

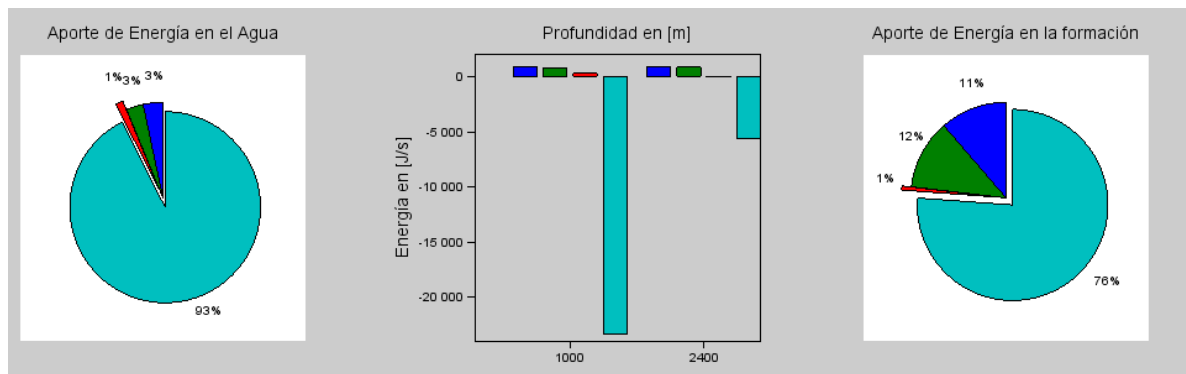


Energía potencial ■ Convección axial ■ conducción-convección radial ■

**Fuente:** Autor

En cuanto al lodo B, se presenta una disminución en cuanto a la transferencia de energía en la formación (de 83% a 76%), por lo que gana un poco de influencia los términos de energía potencial y convección. En base a lo anterior se puede decir que después de cementado el pozo, el riesgo de disociación de los hidratos disminuye un poco comparado con el proceso de perforación.

**Figura 11.** Aportes de energía para el lodo B durante la cementación.



Energía potencial ■ Convección axial ■ Conducción-convección radial ■

**Fuente:** Autor

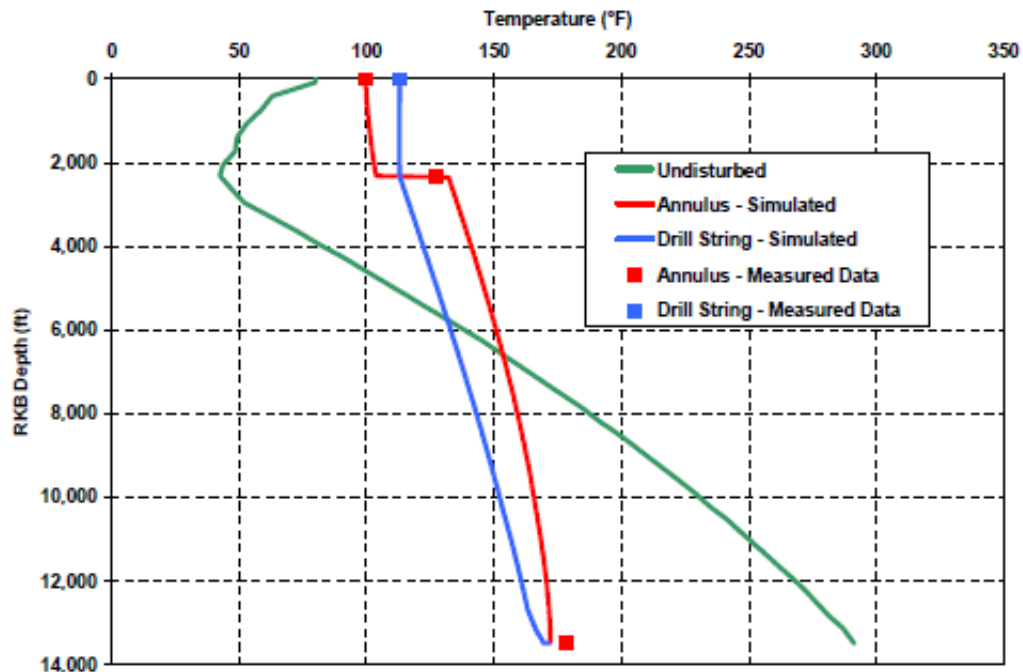
### **4.3. Comparación del modelo matemático**

#### **4.3.1. Modelo propuesto en la literatura**

En la Figura 12 se muestra el modelo propuesto por D. Stiles et all. Donde se puede apreciar que en líneas generales los perfiles de temperatura reportados en la literatura son bastante parejos comparados con los obtenidos con el modelo matemático propuesto.

La línea verde indica el perfil inicial de temperatura del pozo; donde de 0 a 2000 ft se tiene el perfil de temperatura para la columna de agua, de 2000 a 13000 ft se tiene en aumento debido al gradiente geotérmico en la formación. La interfase se encuentra aproximadamente a 2000ft; por arriba de este valor en la columna de agua se puede apreciar que el lodo que desciende por el drill string (azul) presenta una mayor temperatura que el lodo que asciende por el anular(rojo); seguidamente en la interfase el lodo del drill string (azul) disminuye su temperatura y al lodo que asciende por el anular (Rojo) ahora tiene mayor temperatura; esto se debe a que el lodo que asciende está en contacto con la formación y recibe el calor que aporta la rotación de la broca. A los 1300 ft se tiene que la temperatura de ambos lodos es la misma.

**Figura 12.** Perfil de Temperatura del lodo durante el proceso de perforación propuesto por D. Stiles et all.



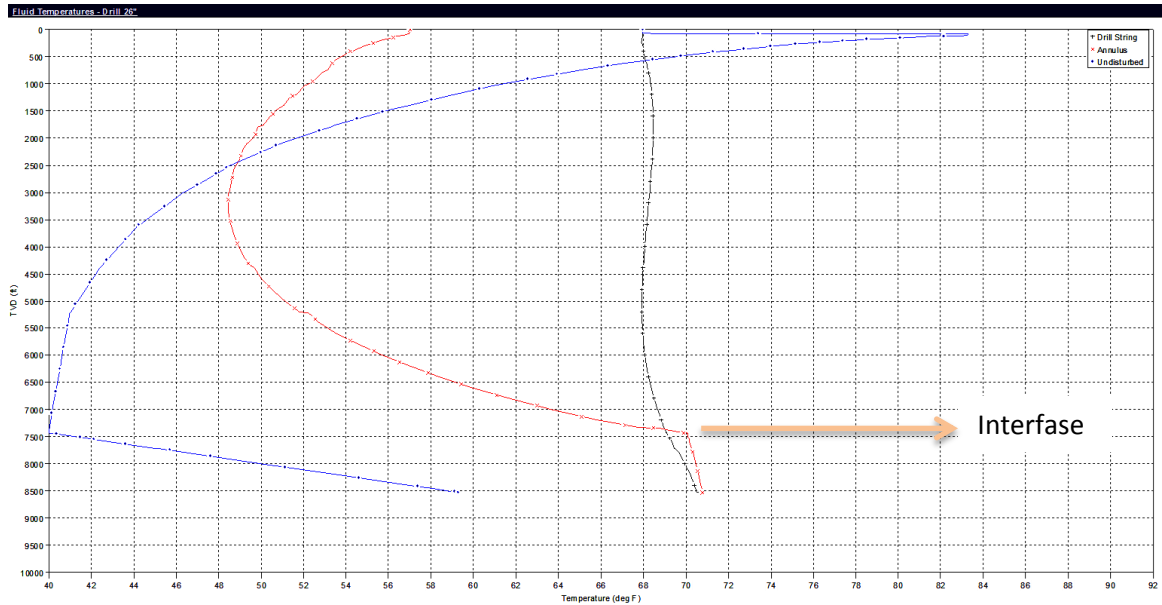
**Fuente:** Mathematical Temperature Simulators for Drilling Deepwater HT/HP wells: Comparisons, Applications, and limitations.

#### 4.3.2. Modelo simulado con wellcat

La simulación en Wellcat incorpora la transferencia de calor durante la perforación de pozo y la circulación del lodo teniendo en cuenta los cambios de presión y temperatura en función del tiempo. Se incluyó la información correspondiente a la temperatura y la velocidad de las corrientes marinas de la capa de agua producto de los modelos ajustados por el oceanógrafo Doctor Efraín Rubio del ICP.

La línea azul indica el perfil inicial de temperatura tanto en la columna de agua como en la formación, la lineal negra representa el perfil de temperatura del lodo que desciende por el drill string y la línea roja el lodo que asciende por el anular.

**Figura 13.** Modelo del pozo de perforación sin cementación simulado en Wellcat.

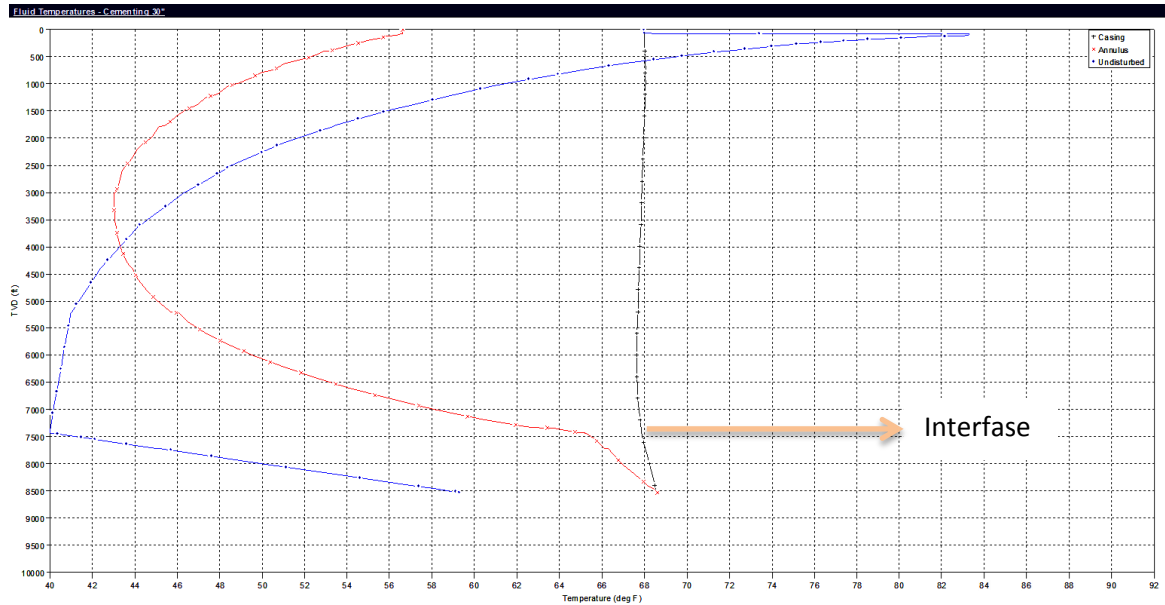


**Fuente:** Autor

En este sentido, en las Figuras 13 y 14 se muestran los perfiles de temperatura obtenidos a partir de la simulación en Wellcat. En la Figura 13 se puede observar que los perfiles de los lodos (línea roja y línea negra) no indican transferencia de calor entre ellos; y que el lodo que asciende por el anular presenta un enfriamiento significativo por la transferencia con la columna de agua. Sin embargo, sugiere que para evitar la disociación de hidratos es necesario que el lodo ingrese a una temperatura de 68°F [20°C] y para la sección que contiene hidratos se alcanza una temperatura máxima de 71°F [21°C] por lo que también se evitaría la disociación de los hidratos.

La simulación en wellcat se compara numéricamente con el modelo matemático propuesto ya se han hecho para el mismo pozo y con las mismas condiciones de profundidad para la columna de agua y para la formación.

**Figura 14.** Modelo del pozo de perforación con cementación simulado en Wellcat.



**Fuente:** Autor

**Tabla 4.** Temperaturas [°C] de lodos de perforación en las interfases de interés para procesos de perforación (sin cementación) y con cementación obtenidas por simulación en Wellcat.

T[°C]	Entrada 0[m]	Interfase 2234[m]	Interfase 2241[m]	Interfase 2247[m]	Final 2245 [m]	Final 2600[m]
<b>Sin cementación</b>						
<b>Lodo A</b>	20,0	20,5	20,5	20,5	21,5	21,4
<b>Lodo B</b>	13,8	19,8	20,4	20,6	21,5	21,5
<b>Con cementación</b>						
<b>Lodo A</b>	20,0	19,9	19,9	19,9	20,3	20,3
<b>Lodo B</b>	13,6	17,0	17,7	17,8	20,3	20,3

**Fuente:** Autor

Por otra parte, en la Tabla 4 se resumen las temperaturas obtenidas para cada condición de perforación en las interfases de interés y obtenidas por simulación en Wellcat. Para ambos casos el lodo B que asciende por el anular presenta un enfriamiento significativo debido a que el modelado incluye la variación de las corrientes marinas, lo que favorece la transferencia entre la columna de agua y el lodo.

Con respecto al proceso de perforación con cementación Figura 14, el lodo que desciende por el drill pipe, lodo A, permanece a temperatura constante tanto en la columna de agua con un ligero aumento en la formación, mientras que cuando el lodo asciende por el anular (lodo B) se presenta una disminución de temperatura en la formación, debido a que el cemento actúa como una resistencia que impide la transferencia de calor entre la formación y el lodo y, por otro lado, a un mayor enfriamiento en la columna de agua causada por la variación de las corrientes marinas.

## 5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones con respecto al modelo matemático propuesto:

1. Permite obtener un análisis detallado de la variación de la temperatura del lodo durante el proceso de perforación en mantos que contienen hidratos de gas.
2. Genera una aproximación de la variación de temperatura en cada punto del sistema de forma bidimensional concebida netamente por transferencia de calor entre el lodo, la columna de agua, la formación y la tubería. Incorpora como variables la energía potencial, el calor transferido de forma radial entre la temperatura del lodo y las tuberías, y un término de convección para la transferencia de calor del lodo en forma axial.
3. Demuestran que para las condiciones de perforación establecidas se evita la disociación de los hidratos de gas. Se recomienda, para mantener estables los hidratos durante el proceso de perforación, hacer un enfriamiento previo del lodo llevándolo a una temperatura aproximada de 20 a 23°C.
4. Los términos más influyentes son la energía potencial y la convección, así como las propiedades y cambios en la velocidad del lodo. Todos tienen variaciones significativas en el perfil de temperatura, por lo que se pueden manipular para mantener estables los hidratos.
5. Presenta algunas diferencias significativas en los resultados obtenidos por simulación en Wellcat. El simulador incluye la variación de las corrientes marinas lo que permite un mayor análisis de transferencia de calor al lodo que asciende por el anular.
6. Los perfiles de temperatura a partir del modelo matemático propuesto presentan la misma tendencia que los perfiles reportados en la literatura.

## 6. RECOMENDACIONES

1. Hacer un análisis más preciso durante la cementación teniendo en cuenta el tiempo de fraguado del cemento. Por otro lado, se debería incluir un estudio de todos los fenómenos de transporte presentes en la broca y que tienen un impacto directo sobre la variación de la temperatura del lodo.
2. Utilizar el simulador Wellcat cuando se requiere de un análisis más general del fenómeno de transferencia de calor en el pozo ya que provee buenos resultados en el cálculo de temperaturas para escenarios que contienen hidratos. Si lo que se requiere es un análisis más detallado y netamente de transferencia de calor, se recomienda utilizar el modelo propuesto incorporando la variación de las corrientes marinas.
3. A partir del modelo matemático propuesto es posible realizar estudios posteriores no para controlar los hidratos, sino para la extracción controlada de estos como una posible fuente de energía. Cabe resaltar que estudios de este tipo se adelantan actualmente en países como Japón, México, Estados Unidos, entre otros.

## 7. BIBLIOGRAFIA

BIRCHWOOD, Richard;et all. Desarrollo en hidratos de gas, Oilfield Review primavera de 2010.p.2-4.7-8.

COLLETT, Timothy; LEWIS, Rick; UCHIDA ,Takashi. El creciente interés en los hidratos de gas. Oilfield Review Otoño de 2000.p.2-4, 7, 14.

C.P, Tan; R, Freij-Ayoub; M.B, Clennell. Managing Wellbore Instability Risk in Gas-Hydrate-Bearing Sediments. En: SPE Oil & Gas conference (Abril,2005: Jakarta,Indonesia).p.2-3.

CIOH "Oceanografía Operacional", Climatología del Caribe. [On line]. [Citado el 10 de Septiembre del 2013] < URL:<http://www.cioh.org.co/meteorologia/ClimatologiaCaribe.php> >

DEVINDER, Mahajan;et all. An introduction to natural gas hydrate/clathrate: The major organic carbon reserve of the Earth .El sevier 2007.p.2.

Diseño y Selección de Risers (PEMEX-Exploración y Producción)

DRILLARD, S;HAMMENTT .Present Technology in Offshore Mobile Drilling Vessels and subsea Equipment. En: SPE Technical Symposium (Marzo,1982:Bejing, China).p.3.

G.J., Moridis; M.B., Kowalsky; LAWRENCE, Berkeley Natl. Response of Oceanic Hydrate-Bearing Sediments to Thermal Stresses. En: Offshore Technology Conference (Mayo,2006:Houston,Texas).p.4.

Handbook Fluidos de perforación 2001

J,Vølstad; T, Tveit; STATOIL. Zonal Isolation through Gas Hydrates Offshore Tanzania. En: SPE/IADC Drilling Conference (Marzo,2013:Netherlands).p.1-3.

KRAUS, Richard. Prospección, perforación y producción de petróleo y gas. Enciclopedia de salud y seguridad del trabajo.p.8-9.

LOPEZ ,Caroll Damarys. Determinación del gradiente geotérmico en un área del caribe colombiano a partir del reflector simulador de fondo (BSR).Trabajo de grado (Geóloga).Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander, 2005.p.70.

Mclver, R. D. Role of naturally occurring gas hydrates in sediment transport. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 1982 p.66.

PKS, Sairam; PATIL, Rahul; PATIL, Sandip. Design Considerations for Isolating Gas-Hydrate-Bearing Zones in Deepwater Environments. En: SPE Production and Operations Conference (Mayo, 2012:Doha,Qatar).p.1-2.

RODRÍGUEZ RUBIO, Efraín. Información existente de las corrientes profundas del caribe colombiano y creación de plan para su adquisición y modelación. Piedecuesta. Instituto Colombiano de Petróleo. Ecopetrol, Abril de 2012.

RODRÍGUEZ RUBIO, Efraín. Avances en las modelaciones oceanográficas de aguas profundas en los bloques fuerte del caribe colombiano. Piedecuesta. Instituto Colombiano de Petróleo. Ecopetrol, Julio de 2012.

STILES, David;TRIGG, Mark. Mathematical Temperature Simulators for Drilling Deepwater HT/HP wells: Comparisons, Applications, and limitations. En: SPE/IADC Drilling Conference (Febrero, 2007:Amsterdam, Netherlands).p.1-24

VASQUEZ, Hernan. Hidratos de Gas. En: Revista Universidad EAFIT ,2012.p.8-10.

Well Cat Landmark- Halliburton User- Manual

XUNCHENG, Song; ZHICHUAN Guan. Coupled modeling circulating temperature and pressure of gas–liquid two phase flow in deep water wells .En: Journal of Petroleum Science and Engineering. Elsevier 2012.

YVES-FRANÇOIS, Thomas;LERMA NICOLAE, Alexandre. Altura significativa del oleaje en la Cuenca Colombiana del Caribe, datos de altimetría radar. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras,INVEMAR, Boletín Científico (2011).p.27-40.

## ANEXOS

### ANEXO A. Secuencia para la perforación

PERFORAR



SACAR TUBERIA



BAJAR CASING

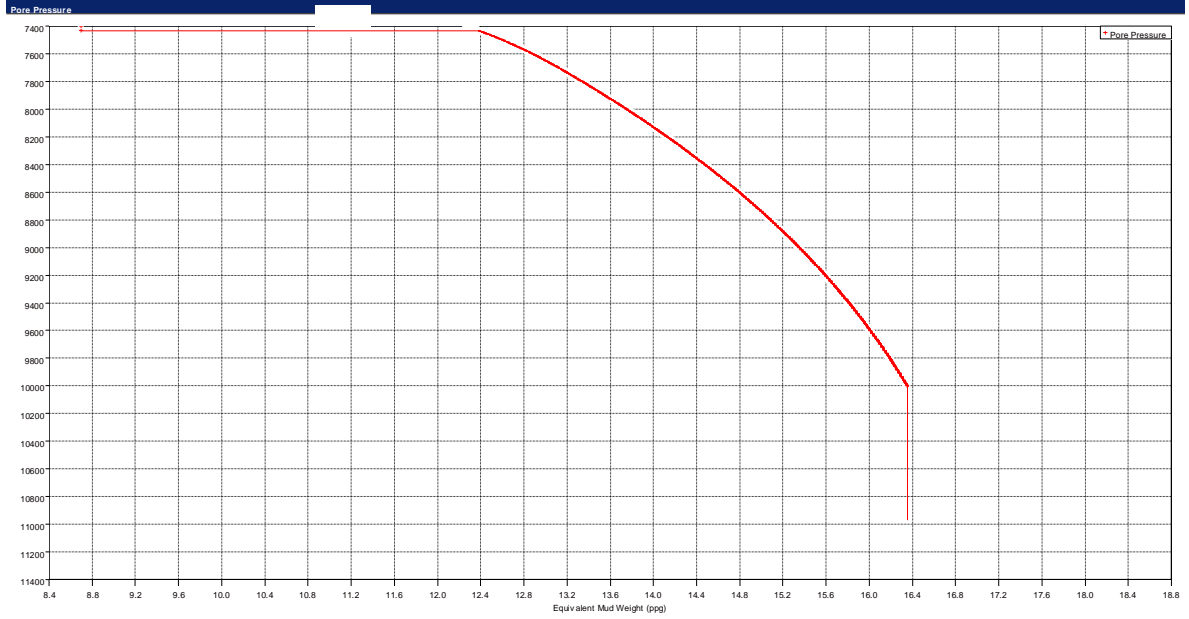


CEMENTAR

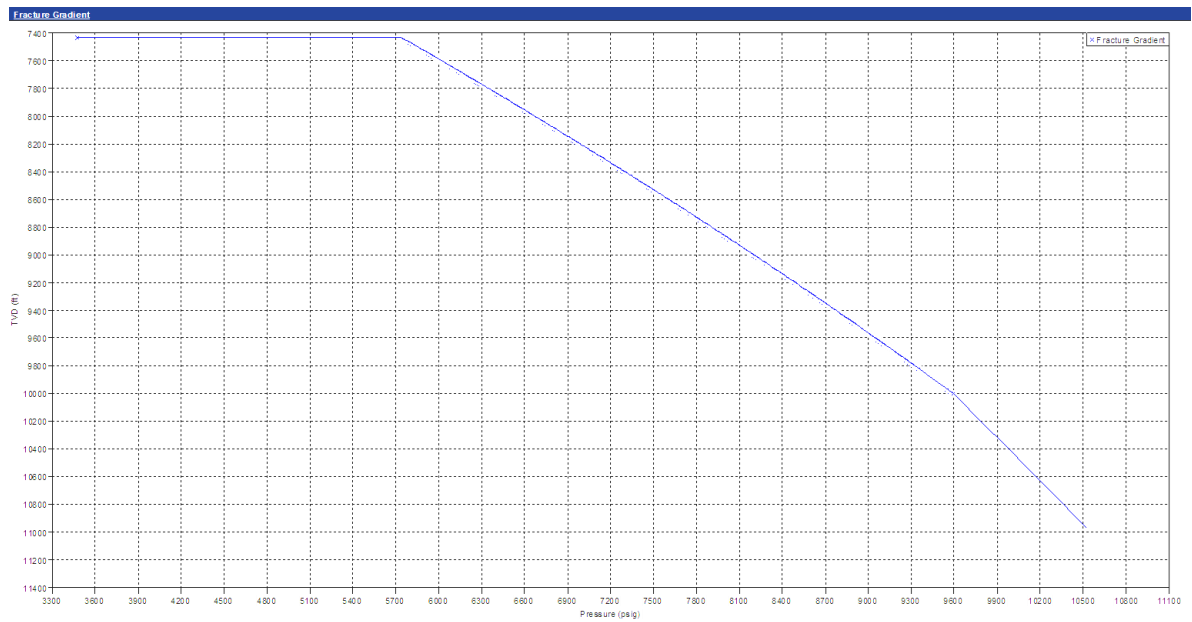


## ANEXO B. Ventana de estabilidad para el peso del lodo

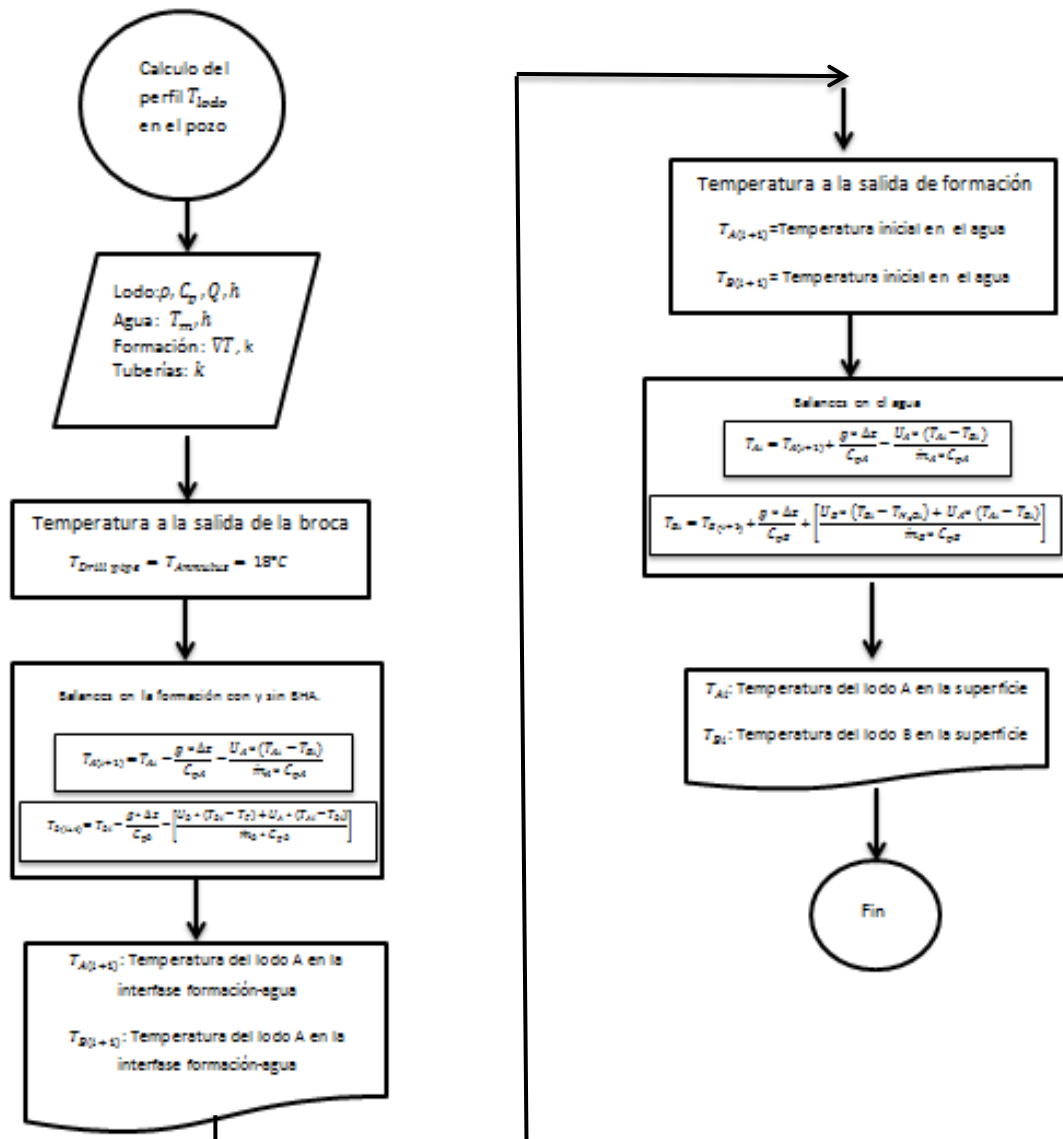
Presión de poro: Los datos de presión de poro fueron modelados por el grupo de geomecánica del instituto Colombiano de petróleo.



## Gradiente de fractura



## ANEXO C. Algoritmo del código



#### **ANEXO D.** Datos de la perforación para el modelado y el modelo matemático.

Mediante la interpretación de reflectores sísmicos se determinó el indicador BSR para una zona de concentración de hidratos que se encuentra a una profundidad de 8471,2981ft, extendiéndose desde el fondo marino, la primera sección se perfora con una broca de 36" usando un lodo base agua de 9 ppg, y un casing de 30", posteriormente a la profundidad de 7510,59 ft se realiza un cambio de la broca de 26" con un casing de 20" y un lodo de 14.5 ppg, cuando ya se ha alcanzado una profundidad de 8531.09ft se continúa perforando el pozo con una broca de 17 1/2" usando un lodo base aceite de 17 ppg de densidad, y con un casing de 13 5/8"

#### Datos de la Perforación

Detalles de Perforación por sección			
Sección	36"	26"	17 1/2"
Profundidad inicial (ft)	7350.59	7510,59	8531.09
Profundidad Final (ft)	7510.59	8531.09	10970.59
Rata de circulación(gal/min)	1000	800	600
Días de operación	3	13	9
Casing	30"	20"	13 3/8"

#### Fluidos de Perforación

Fluidos de Perforación por Sección			
Diámetro de sección	36"	26"	17 1/2"
Densidad (ppg)	9.5	14	17
Viscosidad Plástica (cp.)	33.2	156	49.5
Yield Point (lbf/100ft2)	38	77	47

## Reología de las lechadas de Cemento

Lechadas de completamiento para el pozo Omega							
Lechada de Cemento	Densidad (ppg)	R600	R300	R200	R100	R6	R3
Tipo G	15.8	120	85	74	58	22	17
Tipo H	16.2	110	77	62	52	21	17

## Propiedades para el modelo

	K [W/mK]	Espesor [m]	h [W/m <sup>2</sup> K]
Riser	43,75	0,02	-
Drill pipe	43,75	0,018	-
Casing	43,75	0,02	-
Cemento	0,66	0,15	-
Lodo	0,6	0,39	3,60
Formación	1,4	1,56	1,8
Agua de mar	0,58	1,55	15

**Fuente:** Coupled modeling circulating temperature and pressure of gas–liquid two phase flow in deep water wells.

Densidad del lodo A	14 ppg =1677 Kg /m <sup>3</sup>
Densidad del lodo B	14,2 ppg=1701 Kg /m <sup>3</sup>
Capacidad Calorífica [cp]	3300 [J/Kg K]
Flujo del Lodo A y B	800gal/m <sup>3</sup> =0,0505m <sup>3</sup> /s