



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE
SANTANDER**

Escuela de Ing. Eléctrica, Electrónica y
Telecomunicaciones



MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

**SERGIO NICOLÁS CHAPARRO GIGLIO COBUZIO
WILSON VERTEL SANDOVAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2014



**MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE
EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE**

**SERGIO NICOLÁS CHAPARRO GIGLIO COBUZIO
WILSON VERTEL SANDOVAL**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Electricista**

Director:

DR. HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

Codirector:

MSC. ALFREDO ACEVEDO PICÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2014

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

A Dios, maestro por excelencia, por bendecirme en su sabiduría, acogerme en su manto protector y consagrarme en su gloria a lo largo de mi realización personal.

A mis padres, Adalgiza y Nicolás, por su amor, entrega y apoyo incondicional.

A mi hermano, Mauricio, fiel compañero en la dicha y gran consejero ante la adversidad.

A mis abuelos, Biaggio y Ana, por ser un claro ejemplo de que la unión familiar y la fuerza de voluntad lo puede todo en la vida.

A mis amigos, colegas, familiares, a quienes nunca les terminaré de agradecer por tantas experiencias y vivencias.

*“Aprendí que el coraje no era la ausencia de miedo, sino el triunfo sobre él. El valiente no es quien no siente miedo, sino aquel que conquista ese miedo”. ~
Nelson Mandela*

Sergio Chaparro

**MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL
CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE**



Universidad
Industrial de
Santander

*Este trabajo está dedicado a Dios Padre, Hijo y Espíritu Santo
a Él todo debo y por Él soy, nunca me abandonó*

*A mi madre Blanca Luz Sandoval,
tantos sacrificios se convierten hoy en recompensas*

*A mi nonita Gloria Angarita,
nunca podré pagar todo lo que has hecho por mí,
solo sé que Dios te puso en mi camino para ser mi guía y mi protectora*

*A mis hermanas, Fernanda y Marcela,
juntos en las derrotas, inseparables en las victorias*

*A ti, Marcela Chavez
fuiste luz en mi camino, un ángel de Dios*

*A mis familiares, docentes y amigos,
gracias por todo lo brindado*

Wilson

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

TABLA DE CONTENIDO

Pág

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 22 |
| PRIMERA PARTE..... | 25 |
| FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO POR EFECTO JOULE..... | 25 |
| MARCO TEÓRICO. | 26 |
| 1.1 CRUDOS PARAFÍNICOS..... | 28 |
| 1.2 EFECTO DE LA TEMPERATURA..... | 29 |
| 1.3 CONSECUENCIAS DEL DEPÓSITO DE PARAFINAS EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO..... | 30 |
| 1.4 MODELO DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA PARA EL SISTEMA TUBERÍA DE PRODUCCIÓN-CABLE DE RETORNO | 32 |

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

| | | |
|-------|---|-----------|
| 1.4.1 | <i>Parámetros Conductor Cilíndrico Hueco</i> | 38 |
| 1.4.2 | <i>Parámetros Conductor de Retorno Electrosumergible</i> | 39 |
| 1.5 | MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO POR EFECTO JOULE | 43 |
| 1.5.1 | <i>Transporte de Calor en la Formación</i> | 46 |
| 1.5.2 | <i>Temperatura en la Formación</i> | 46 |
| 1.5.3 | <i>Distribución de Temperatura en la Formación</i> | 47 |
| 1.5.4 | <i>Solución de la Ecuación de Difusividad</i> | 51 |
| 1.5.5 | <i>Coefficiente de Transferencia de Calor para Pozos</i> | 57 |
| 1.5.6 | <i>Pérdida de Calor en la Formación</i> | 62 |
| | ESTADO DEL ARTE | 66 |
| 2.1 | ANTECEDENTES HISTÓRICOS | 66 |
| 2.2 | CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO | 68 |
| 2.3 | MÉTODOS DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO | 71 |
| 2.3.1 | <i>Calentamiento de Alta Frecuencia</i> | 72 |

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

| | | |
|----------------------------------|---|-----------|
| 2.3.2 | <i>Calentamiento Electromagnético Inductivo</i> | 73 |
| 2.3.3 | <i>Calentamiento Eléctrico Resistivo</i> | 74 |
| 2.4 | SISTEMAS DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO | 76 |
| 2.5 | APLICACIONES COMERCIALES..... | 83 |
| SEGUNDA PARTE | | 87 |
| PRUEBAS Y RESULTADOS..... | | 88 |
| 3.1 | SELECCIÓN DEL POZO Y DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA..... | 88 |
| 3.2 | SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL MODELO TÉRMICO DE LA TUBERÍA DE UN POZO DE PRODUCCIÓN | 96 |
| 3.3 | SIMULACIÓN GRÁFICA DEL MODELO TÉRMICO DE LA TUBERÍA DE UN POZO DE PRODUCCIÓN..... | 101 |
| 3.3.1 | <i>Resultados de la simulación gráfica para el punto de cristalización de las parafinas</i> | 105 |
| 3.3.2 | <i>Resultados de la simulación gráfica para el punto de fusión de las parafinas</i> | 106 |

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

| | |
|---|-----|
| 3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO POR EFECTO JOULE FRENTE AL SICP | 108 |
|---|-----|

COSTOS ENERGÉTICOS..... 111

| | |
|---|-----|
| 4.1 COSTOS DE EXTRACCIÓN Y COSTOS ENERGÉTICOS DEL CAMPO ESCUELA COLORADO..... | 112 |
|---|-----|

| | |
|--|-----|
| 4.2 CÁLCULO DEL COSTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA CONSIDERANDO EL “TUBING” CON AISLAMIENTO | 114 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| 4.3 CÁLCULO DEL COSTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA CONSIDERANDO EL “TUBING” SIN AISLAMIENTO | 115 |
|--|-----|

| | |
|-----------------------------|-----|
| 4.4 RESUMEN DE COSTOS | 117 |
|-----------------------------|-----|

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....119

| | |
|---|------------|
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS. | 123 |
|---|------------|

| | |
|---------------------------|------------|
| BIBLIOGRAFÍA. | 128 |
|---------------------------|------------|

| | |
|--------------------|------------|
| ANEXOS..... | 132 |
|--------------------|------------|



LISTA DE FIGURAS

Pág

| | |
|--|----|
| FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN INTERNA DE UN POZO REAL, ADECUADO PARA CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO Y SU EQUIVALENTE EN PARÁMETROS CIRCUITALES | 34 |
| FIGURA 2. MODELO π DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN AÉREA..... | 36 |
| FIGURA 3. MODELO π DEL CIRCUITO TUBERÍA DE PRODUCCIÓN-CABLE DE RETORNO. | 37 |
| FIGURA 4. ESQUEMA CILINDRO HUECO..... | 38 |
| FIGURA 5. CABLE PLANO PARA ALIMENTACIÓN DE BOMBAS SUMERGIBLES PE+PVC 75 °C, 1 000 V CON CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA Y CUBIERTA EXTERIOR DE PVC..... | 42 |
| FIGURA 6. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA POZO COL-25 CAMPO ESCUELA COLORADO..... | 44 |
| FIGURA 7. ESQUEMA DE UN PERFIL DE TEMPERATURA DE FORMACIÓN A UNA PROFUNDIDAD DADA ALREDEDOR DEL HOYO. | 50 |
| FIGURA 8. BALANCE DE ENERGÍA PARA EL FLUIDO DEL POZO..... | 54 |
| FIGURA 9. TUBERÍA DE PRODUCCIÓN CON AISLADOR TUBING-CASING Y AISLADOR ELÉCTRICO EN FIBRA DE VIDRIO. | 60 |
| FIGURA 10. <i>HERRAMIENTAS DE CALENTAMIENTO POR RADIOFRECUENCIA</i> | 73 |

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

| | |
|---|-----|
| FIGURA 11. VISTA LATERAL DEL CALENTADOR PATENTADO POR PERSHING SUSPENDIDO DENTRO DEL POZO | 78 |
| FIGURA 12. VISTA LATERAL DEL DISPOSITIVO DE CALENTAMIENTO PATENTADO POR STEGEMEIER. | 79 |
| FIGURA 13. SECCIÓN LONGITUDINAL DEL APARATO DE CALENTAMIENTO PATENTANDO POR MCCARTHY INSTALADO EN EL POZO | 81 |
| FIGURA 14. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE PATENTADO POR BRIDGES. | 82 |
| FIGURA 15. VISTA LATERAL E INTERIOR DE LA HERRAMIENTA CONSTRUIDA POR LYNBROOK HEATING | 84 |
| FIGURA 16. VISTA LATERAL E INTERIOR DE LA HERRAMIENTA CONSTRUIDA POR LYNBROOK HEATING..... | 85 |
| FIGURA 17. PERFIL MECÁNICO DEL POZO COL-25. | 90 |
| FIGURA 18. VÍA DE ACCESO AL POZO COL-25. | 91 |
| FIGURA 19. CABEZA DEL POZO COL-25..... | 91 |
| FIGURA 20: DELIMITACIÓN GRÁFICA DE LAS ÁREAS DE SIMULACIÓN..... | 102 |
| FIGURA 21. AJUSTE DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA PARA LAS ÁREAS DE SIMULACIÓN | 102 |

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

| | |
|---|-----|
| FIGURA 22. ESPECIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES DEL FLUJO DE CALOR..... | 103 |
| FIGURA 23. AJUSTE DEL TIEMPO DE SIMULACIÓN Y DE LA TEMPERATURA INICIAL..... | 104 |
| FIGURA 24. SIMULACIÓN GRÁFICA DEL GRADIENTE TÉRMICO RESULTANTE | 104 |
| FIGURA 25. GRADIENTE TÉRMICO PARA EL PUNTO DE CRISTALIZACIÓN (SIN AISLAMIENTO) | 105 |
| FIGURA 26. GRADIENTE TÉRMICO PARA EL PUNTO DE CRISTALIZACIÓN (CON AISLAMIENTO) | 106 |
| FIGURA 27. GRADIENTE TÉRMICO PARA EL PUNTO DE FUSIÓN (SIN AISLAMIENTO)..... | 107 |
| FIGURA 28. GRADIENTE TÉRMICO PARA EL PUNTO DE FUSIÓN (CON AISLAMIENTO) | 107 |

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

LISTA DE TABLAS



Universidad
Industrial de
Santander

Pág

| | |
|--|----|
| TABLA 1. COMPARACIÓN PARÁMETROS CIRCUITALES POR TRAMOS | 35 |
| TABLA 2. CAPACIDAD DE CORRIENTE PERMISIBLE | 40 |
| TABLA 3. CATÁLOGO DE CABLE ELECTROSUMERGIBLE | 41 |
| TABLA 4. SÍNTESIS DE ANTECEDENTES HISTÓRICOS..... | 70 |
| TABLA 5. DIFERENCIAS ENTRE EL MÉTODO INDUCTIVO Y EL MÉTODO RESISTIVO. | 76 |
| TABLA 6. DIMENSIONES DEL POZO COL-25 | 92 |
| TABLA 7. PARÁMETROS GENERALES DEL CRUDO DEL POZO COL-25..... | 93 |
| TABLA 8. DIMENSIONES Y PROPIEDADES TÉRMICAS DEL AISLAMIENTO TÉRMICO ESCOGIDO | 93 |
| TABLA 9. PROPIEDADES TÉRMICAS GENERALES DE LOS MEDIOS FÍSICOS DEL POZO COL-25..... | 94 |
| TABLA 10. VARIACIÓN DEL PUNTO DE CRISTALIZACIÓN DE LA PARAFINA DEL POZO COL-25 CON RELACIÓN A LA PRESIÓN, TEMPERATURA DEL FLUIDO Y PROFUNDIDAD | 95 |

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

| | |
|---|-----|
| TABLA 11. COEFICIENTES TÉRMICOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA | 98 |
| TABLA 12. POTENCIAS CALCULADAS PARA ALCANZAR LAS TEMPERATURAS DE CRISTALIZACIÓN Y FUSIÓN DE LAS PARAFINAS. | 100 |
| TABLA 13. CUADRO COMPARATIVO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO POR EFECTO JOULE FRENTE AL SICP | 109 |
| TABLA 14. COSTOS CAMPO ESCUELA COLORADO. | 113 |
| TABLA 15. TEMPERATURAS DE FUSIÓN Y DE CRISTALIZACIÓN DEL CAMPO ESCUELA COLORADO..... | 114 |
| TABLA 16. POTENCIAS ELÉCTRICAS PARA EL “TUBING” CON AISLAMIENTO..... | 114 |
| TABLA 17. POTENCIAS ELÉCTRICAS PARA EL “TUBING” SIN AISLAMIENTO. | 116 |
| TABLA 18. PRECIO DE LA ENERGÍA PARA EL “TUBING” CON AISLAMIENTO. | 117 |
| TABLA 19. PRECIO DE LA ENERGÍA PARA EL “TUBING” SIN AISLAMIENTO..... | 118 |

LISTA DE ANEXOS



| | |
|---|-------------|
| ANEXO A CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL “TUBING” MODELADO COMO UN CILINDRO HUECO | 1322 |
| A.1 RESISTENCIA LONGITUDINAL | 1322 |
| A.2 CÁLCULO INDUCTANCIA | 136 |
| ANEXO B SELECCIÓN DEL AISLAMIENTO TÉRMICO-ELÉCTRICO DEL “TUBING” | 1412 |
| B.1 DESCRIPCIÓN..... | 1412 |
| ANEXO C SELECCIÓN DEL POZO DE PRODUCCIÓN DE CAMPO ESCUELA COLORADO | 1433 |
| ANEXO D ALGORITMO AD HOC DESCRITO EN MATLAB® PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL MODELO TÉRMICO DEL POZO COL-25..... | 146 |



GLOSARIO

- API:** American Petroleum Institute, formada en 1917. Es una organización sin fines de lucro, que sirve para coordinar y promover el interés de la industria petrolera en su relación con gobiernos y otros.
- CASING:** Tubería del mismo diámetro del pozo, actúa para contenerlo evitando que se derrumbe. Posee orificios en la pared en diferentes profundidades a lo largo del yacimiento en los estratos con petróleo.
- GRADO API:** Clasificación para petróleo con propósitos particulares en función de su densidad.
- TEMPERATURA:** Es la energía media de las moléculas que componen una sustancia. Su unidad de medida en el sistema internacional es el grado Celsius (°C).
- TUBING:** Tubería de producción encargada de transportar el hidrocarburo hasta la superficie.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

RESUMEN

TÍTULO: MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE¹

AUTORES²: SERGIO NICOLÁS CHAPARRO GIGLIO COBUZIO, WILSON VERTEL SANDOVAL.

PALABRAS CLAVES: *Calentamiento electromagnético, Parafinas, Tubería de producción, cable de retorno, Efecto Joule.*

CONTENIDO:

El presente trabajo de investigación expone el procedimiento para realizar el modelado y simulación de un sistema de calentamiento eléctrico resistivo de un pozo por inyección de corriente hasta el fondo del mismo, denominado “calentamiento del tubo de conducción de crudo por Efecto Joule”. Este sistema tiene por objetivo incrementar la variación de temperatura en la tubería de producción (“*tubing*”) de un pozo petrolífero logrando la descomposición de cúmulos de parafina formados en las paredes de la tubería. Como parte del sistema se propone la utilización de la tubería misma como elemento generador de calor por disipación de energía eléctrica y un cable de retorno que se acople a la tubería para cerrar el circuito eléctrico. Con esto se logra aprovechar al máximo los elementos estructurales que hacen parte de un pozo de producción, ya que no se requiere introducir herramientas especiales ni instrumentos en el pozo para efectuar su calentamiento, excepto el cable de retorno que por las condiciones de trabajo es un cable electrosumergible con las mismas propiedades del cable que alimenta la bomba de extracción de crudo. Este incremento de temperatura facilita la movilidad del crudo en el “*tubing*” ya que la viscosidad es fuertemente dependiente de la temperatura. En consecuencia, se espera que el trabajo del sistema de calentamiento del tubo de producción mejore el nivel de producción de un pozo, ya que la producción se ve limitada por la capacidad de las bombas de extracción y no por la capacidad real del pozo.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ing. Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Hermann Raúl Vargas Torres. Codirector: Alfredo Rafael Acevedo Picón.



MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

ABSTRACT

TITLE: SIMULATION AND MODELLING OF THE OIL CONDUCTION PIPE FACING HEATING BY JOULE EFFECT³

AUTHORS⁴: SERGIO NICOLAS CHAPARRO GIGLIO COBUZIO, WILSON VERTEL SANDOVAL

KEYWORDS: *Electromagnetic heating, Parrafins, Production Pipe, Return Cable, Joule Effect.*

CONTENT:

This investigation work addresses the modelling and simulation of an electromagnetic heating system of an oil well by current injection to the bottom of itself, called "heating of the oil conduction pipe by joule effect". This system goal is to increase and control the temperature gradient in the production pipe (tubing) of an oil pipe achieving the decomposition of paraffin heaps formed in the pipe walls. As addition of this system its propose the use of the pipe itself as a heat generating element by electric energy dissipation and a return cable attached to the pipe for close the electric circuit. This makes take maximum advantage of the structural elements that make part of a production well, because it doesn't require introduce special tools nor do instruments in the well for make its heating done, except the return cable that it's an electric submersible cable by the work conditions with the same properties of the cable that supply the oil extraction pump. This temperature increase make easier the oil mobility in the tubing since its viscosity it's strong dependently of the temperature. Consequently, the work of the heating system of the production pipe hopes to improve the production level of an well since its production it's limited by the extraction pump capacity and not because the real capacity of the well.

³ Bachelor Thesis

⁴ Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ing. Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Advisor: Hermann Raúl Vargas Torres. Coadvisor: Alfredo Rafael Acevedo Picón.



INTRODUCCIÓN

El sector energético de los hidrocarburos presenta una limitación en la producción de crudo debido a diversos problemas. Uno de ellos, se genera en las paredes de la tubería de producción debido a las propiedades viscosas del crudo que ocasionan la formación de cúmulos de un producto ceroso derivado del petróleo denominado parafina, el cual se acumula en las paredes de la tubería de extracción (“tubing”). La acumulación de depósitos de parafina es uno de los mayores inconvenientes en la producción, transporte y almacenamiento de crudo. Estos depósitos ocasionan la reducción de la permeabilidad de la roca y obstruyen el paso del crudo en la cara de la formación; En el pozo, causan daños al equipo de subsuelo y reducen el diámetro efectivo de las tuberías disminuyendo la producción.

Históricamente, el Campo Escuela Colorado⁵ ha visto afectada la producción de crudo de varios de sus pozos debido a la fuerte tendencia a la formación y acumulación de ceras parafínicas. Diversas técnicas se han desarrollado con el objetivo de incrementar la producción de los yacimientos, técnicas que abarcan numerosas áreas de la ciencia, desde procesos químicos, mecánicos, hasta sistemas eléctricos.

Para resolver este problema del Campo Escuela Colorado, se propone una técnica no convencional consistente en el calentamiento eléctrico resistivo del pozo por inyección de corriente, denominada “calentamiento del tubo de

⁵ El Campo Escuela Colorado es una entidad de investigación científica y tecnológica producto de un convenio entre la Universidad Industrial de Santander –UIS y La Empresa Colombiana de Petróleos –ECOPETROL.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

conducción de crudo por Efecto Joule”, la cual tiene como finalidad elevar la temperatura del crudo en el tubo de producción por acción de la transformación en calor de las pérdidas eléctricas en la tubería ante el paso de corriente eléctrica. Este proceso es conocido como calentamiento resistivo y permite mejorar el flujo del crudo en el pozo y por consiguiente la producción del mismo a través de la disolución de las parafinas concentradas en las paredes de las tuberías por medio de temperaturas elevadas.

La simulación de la técnica, se aplica al pozo COL-25 del Campo Escuela Colorado. La técnica de calentamiento se puede aplicar a distintos pozos que presentan precipitación de parafinas, teniendo que ser ajustados los parámetros específicos del pozo correspondiente.

La técnica de calentamiento del tubo de conducción de crudo por Efecto Joule se desarrolla a partir de una técnica no convencional conocida como Sistema de Inyección de Corriente en Pozos (SICP) [6]. Esta se basa en el calentamiento eléctrico resistivo de la tubería de producción (tubing-casing), a diferencia de la propuesta actual que solo usa el tubing para realizar el calentamiento. Teniendo en cuenta el modelo eléctrico y de transferencia de calor planteado en el SICP, se formulan nuevos modelos teóricos con el objetivo de mejorar el uso de los recursos energéticos y el proceso de extracción de crudo.

En el primer capítulo, se describen los conceptos teóricos en los cuales está sustentado el calentamiento de la tubería de producción de crudo por Efecto Joule. A continuación, en el segundo capítulo, se presenta una reseña histórica de distintas técnicas de calentamiento electromagnético desarrolladas para combatir la formación de parafinas y mejorar el proceso de producción de crudo. Por último, en el tercer capítulo se muestran los resultados de la simulación

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

numérica del método de calentamiento del tubo de conducción de crudo por Efecto Joule aplicado al pozo COL-25 del Campo Escuela Colorado.



Universidad
Industrial de
Santander

**MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL
CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE**



Universidad
Industrial de
Santander

PRIMERA PARTE

**FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL TUBO
DE CONDUCCIÓN DE CRUDO POR EFECTO JOULE**



1. MARCO TEÓRICO.

En el presente trabajo, el sistema de calentamiento del tubo de producción⁶ por Efecto Joule, está basado en electrónica de potencia aplicada a baja frecuencia (otorgándole a dicho calentamiento un carácter netamente resistivo) por inyección de corriente eléctrica con el fin de disolver o descomponer cúmulos de parafinas pegados a las paredes del “tubing” y que impiden el proceso normal de producción de crudo. Para tal efecto, el sistema de calentamiento del tubo de conducción de crudo por Efecto Joule opera de la siguiente manera: Al “tubing” se le hará circular corriente eléctrica[2] hasta el fondo del pozo, en donde se interconecta (por medio de un conector que realiza el acople “tubing”-cable de retorno), con un conductor de retorno y éste a su vez en la superficie con la tierra del sistema⁷, cerrando de este modo el circuito.

El conductor de retorno se emplea para cerrar el circuito y se selecciona con las propiedades adecuadas para soportar las condiciones de trabajo térmicas y eléctricas del sistema. Las parafinas tienen contacto directo con las paredes del “tubing”, de ahí la importancia de calentar por completo el “tubing”. La función del cable de retorno es también brindar una baja impedancia a la impedancia total del sistema eléctrico puesto que las pérdidas en el conductor no servirán para calentar el crudo. Este procedimiento genera un incremento de temperatura en el

⁶ Tubería de producción comprendida por el conjunto “tubing”-“casing”. Solo se hará el calentamiento al “tubing” de la tubería.

⁷ El sistema de puesta a tierra fue diseñado en una investigación anterior del Campo Escuela Colorado [6].

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

tubo de producción como consecuencia de las pérdidas eléctricas propias del acero, material ferromagnético con el cual se fabrica la tubería de producción.

Esta técnica no convencional presenta dentro de sus principales ventajas la simplicidad de la misma, ya que no es necesario introducir dispositivos especiales en la tubería para lograr su funcionamiento. Por consiguiente, no sería necesario realizar grandes ajustes para aplicarlos en un pozo. Además, su funcionamiento no interrumpe la producción del pozo y alarga considerablemente los tiempos de mantenimiento, bien sea por el mejoramiento en la movilidad del crudo en la tubería, al no permitir la solidificación de parafinas en tramos de tubería donde las condiciones fueran propicias para este fenómeno; o por reducción del esfuerzo en las bombas de extracción, las cuales al reducir la viscosidad del crudo, disminuyen su trabajo y prolongan su vida útil.

A continuación se hace una introducción al tema de los crudos parafínicos y su incidencia en la producción de crudo. También se aborda el efecto de la temperatura en la disolución de los cúmulos de parafinas y el umbral de cristalización⁸ de parafinas para el Campo Escuela Colorado. Por último se describen las consecuencias que los depósitos de parafinas causan en el Campo Escuela Colorado y los modelos de impedancia eléctrica y transferencia de calor realizados para el sistema de calentamiento del tubo de producción de crudo por Efecto Joule.



Universidad
Industrial de
Santander

⁸ Es la temperatura a la cual se empiezan a formar cristales de parafina en el pozo.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

1.1 Crudos Parafínicos

Debido a que la finalidad del calentamiento del tubo de producción de crudo por Efecto Joule es elevar la temperatura de los crudos en ascenso por éste, es adecuado comenzar por definir qué es un crudo parafínico y cuáles son sus características significativas, las cuales dependen en gran medida de la temperatura y de las propiedades particulares de cada fluido. Cabe aclarar, que el estudio realizado sobre el comportamiento térmico del crudo dentro de la tubería no es el objetivo principal de esta investigación, si no el estudio eléctrico del sistema para conocer la potencia eléctrica requerida para calentar lo suficiente la tubería, y a través de la transferencia de calor, lograr la temperatura necesaria en el crudo para lograr la descomposición de los cúmulos de parafina.

Las ceras parafínicas típicas están compuestas por cadenas entre C16 y C60+ de hidrocarburos saturados que presentan temperaturas de fusión en un rango de 64 °F a 211 °F. Los cúmulos parafínicos se componen de resinas, material asfáltico, arena, escamas y en ciertas ocasiones de agua. Son de naturaleza cristalina y por debajo de la temperatura de nube o cristalización tienden a precipitarse en el crudo.

Debido a las diferentes condiciones de operación que se presentan durante el proceso de producción, los hidrocarburos experimentan ciertos fenómenos fisicoquímicos y termodinámicos complejos. Como resultado de estas alteraciones, se producen cambios de fase (paso de líquido a sólido y a gas), con la correspondiente segregación de sus partículas (parafinas, asfaltenos y resinas) originando una obstrucción del flujo que trae como consecuencia pérdidas en el proceso de producción.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Existe un comportamiento ideal esperado en el proceso de producción y es aquel en el que no se presente obstrucción por ceras parafínicas y el fluido del pozo llegue a la superficie con una temperatura superior a la de cristalización. No obstante, existen diversos factores que impiden este comportamiento ideal, por lo que se hace necesario realizar un estudio que permita caracterizar el fluido, todo esto para poder determinar e implementar los métodos de control de depósito de parafinas que permita asegurar un flujo hasta la superficie.

Para una temperatura de la formación por debajo del punto de cristalización, la parafina precipitará y es probable que se acumule en los poros de la formación, causando una restricción al flujo [1].

1.2 Efecto de la Temperatura

La temperatura presenta una relación directa con la profundidad que afecta a los hidrocarburos cuando se encuentran a condiciones de yacimiento. La temperatura disminuye conforme los fluidos se acercan a la superficie durante el proceso de producción.

Un factor fundamental en la solubilidad de la parafina (solute) dentro del solvente (crudo sin parafina) es la temperatura que al incrementarse acelera la solubilidad de la parafina causando su descomposición.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

El depósito de parafinas está caracterizado por cuatro temperaturas: Punto de nube o de cristalización⁹, punto de gel, punto de fluidez y temperatura de fusión [1].

La temperatura de cristalización es aquella a la cual precipita el primer cristal de parafina; Seguido, el punto de fluidez es la temperatura a la cual el crudo deja de fluir; El punto de fusión es la temperatura a la que la sustancia pasa de sólido a líquido y la temperatura de gel es aquella a la cual se inicia la formación de una red cristalina, cuando el fluido está en reposo y se enfría el crudo por debajo del punto de fluidez. ¹⁰

1.3 Consecuencias del depósito de parafinas en el Campo Escuela Colorado

El problema de las ceras parafínicas ha sido el principal problema en el proceso operativo que desde los inicios ha tenido el Campo Colorado debido a los depósitos de parafinas ocasionados básicamente por la disminución de la temperatura y presión en los fluidos durante el proceso de extracción que trae como consecuencias bajas en la producción y hasta abandono de pozos.

Existen diversos factores que afectan la tasa de producción de un pozo, por ejemplo el detrimento o no efectividad del método de levantamiento artificial, la

⁹ La cristalización es el comienzo del fenómeno de generación de redes cristalinas o "geles" por un descenso simultáneo descenso en la temperatura del crudo.

¹⁰ Para la disolución de las parafinas se tienen en cuenta las temperaturas de cristalización y fusión por ser las temperaturas a las cuales se forman los primeros cúmulos de parafinas y se diluyen los cúmulos ya formados, respectivamente.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

reducción del índice de productividad, el incremento del daño de formación como resultado de cambios físicos en los alrededores de la cara del pozo causantes de “deposición” de parafinas o asfaltenos¹¹, por la acumulación de arena, lodo o por cambios en la presión en las proximidades de la cara del pozo. Según datos proporcionados por el Campo Escuela, la declinación en la producción en los pozos del Campo Colorado (promediando el 15% anual), se debe principalmente al problema de “deposición” de parafinas.

El método principal para dar solución a este problema ha sido el de inyección de aceite caliente en las líneas de superficie y químicos por el anular del pozo recirculados a través del equipo de subsuelo.

Este problema se ha tratado de solucionar mediante el método remedial de inyección de aceite caliente en las líneas de superficie y químicos por el anular del pozo recirculados a través del equipo de subsuelo. Sin embargo, de acuerdo a algunos estudios realizados por parte del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) para campos cercanos al área de Colorado y con características semejantes respecto al problema de parafinas, la inyección de aceite caliente durante el pasado, sin tener en cuenta características propias del crudo, puede ser la causante del bajo nivel productivo de los pozos al originar precipitación y/o “deposición” de parafinas directamente en la cara del pozo, causando daños a la formación.

Las claridad en el conocimiento de las condiciones y características de la precipitación y deposición de parafinas son fundamentales para la aplicación de

¹¹ Son una familia de compuestos químicos orgánicos del petróleo crudo y representan los compuestos más pesados y por tanto, los de mayor punto de ebullición.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

cualquier método preventivo o correctivo que se aplique al pozo como solución ya que puede traer consecuencias futuras en la vida productiva del yacimiento.

Como resultado de lo anterior, el método de calentamiento del tubo de producción por Efecto Joule se plantea como un método correctivo-preventivo.

El modelo que caracteriza las pérdidas eléctricas que se presentan en la tubería del pozo de producción está compuesto por dos desarrollos teóricos: El primero presenta el Modelo de Impedancia Eléctrica para la Tubería de Producción en conjunto con el cable de retorno los cuales componen el circuito eléctrico del sistema. El segundo muestra el proceso de transferencia de calor en la tubería por medio del cual se obtendrá la descomposición de las parafinas en el pozo[1].

1.4 Modelo de Impedancia Eléctrica para el sistema Tubería de Producción-cable de retorno

Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de calentamiento del tubo de conducción de crudo por efecto joule se realiza a través del “tubing”, cuyas paredes tienen contacto directo con el crudo en el proceso de transferencia de calor. El circuito eléctrico se cierra a través de un cable de retorno electrosumergible cuyas características eléctricas se describirán a continuación.

Para tener una idea más clara del comportamiento eléctrico del sistema se propone modelar la tubería y el cable de retorno en función de sus parámetros eléctricos por unidad de longitud: Resistencia (R) e Inductancia (L). El sistema

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

eléctrico se compone del “tubing” y el cable de retorno y un conector diseñado para realizar el acople entre la tubería y el cable de retorno.

Para realizar el desarrollo teórico, inicialmente el “tubing” se modela como un conductor cilíndrico hueco y en conjunto con el cable de retorno se analiza como una línea de transmisión con el modelo π [3]. Debido a la pequeña impedancia del conector de acople “tubing”-cable de retorno y a su alta conductividad, ésta se desprecia en el cálculo de la impedancia total del sistema. En este modelo se desprecia el efecto capacitivo que se presenta en las líneas de transmisión aéreas debido a que el sistema tubería de producción-cable de retorno se encuentra enterrada y el circuito representado como una línea de transmisión no presenta una longitud suficiente para que éste sea considerado, situación que además se sustenta a partir de los cálculos de los parámetros eléctricos realizados para el SICP[6] para la capacitancia en diversos tramos de una tubería de producción de un pozo del Campo Escuela similar en propiedades y dimensiones a la tubería del pozo COL-25, cuyos resultados como habrían de esperarse resaltan un aporte insignificante de dicho parámetro a la impedancia total de dicha tubería de producción. Tal cual se ilustra en la siguiente figura:



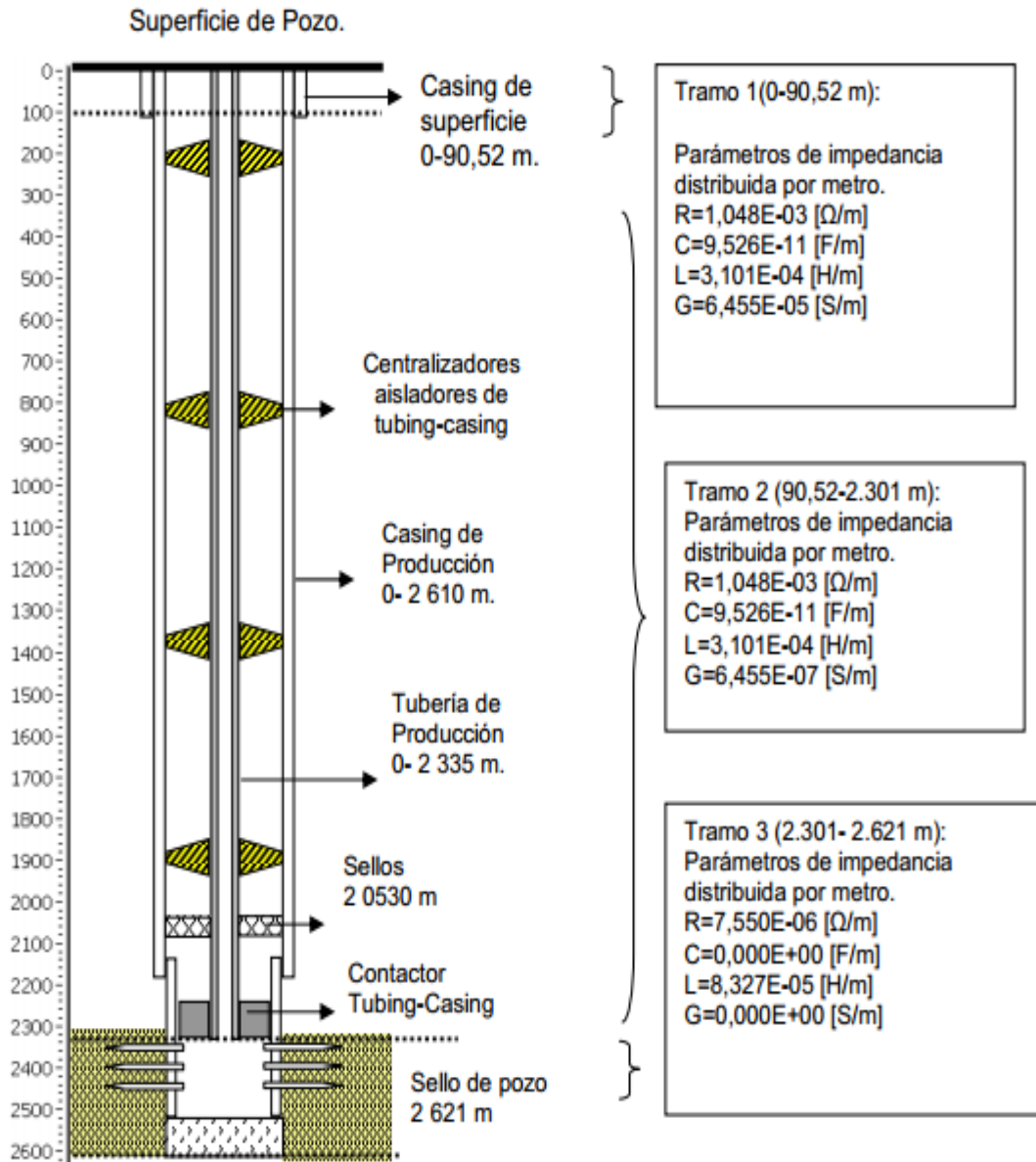
Universidad
Industrial de
Santander

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Figura 1. Distribución interna de un pozo real, adecuado para calentamiento electromagnético y su equivalente en parámetros circuitales



Fuente: [6]

A continuación, se consignan los parámetros circuitales en la tabla 1 para su formal comparación:

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Tabla 1. Comparación parámetros circuitales por tramos

| Parámetro | Tramo 1 (0-90,52[m]) | Tramo 2 (90,52-2031[m]) | Tramo 3 (2031-2621[m]) |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Resistencia [Ω/m] | $1,048 \cdot 10^{-3}$ | $1,048 \cdot 10^{-3}$ | $7,550 \cdot 10^{-3}$ |
| Capacitancia [F/m] | $9,526 \cdot 10^{-11}$ | $9,526 \cdot 10^{-11}$ | 0 |
| Conductancia [G/m] | $6,455 \cdot 10^{-5}$ | $6,455 \cdot 10^{-7}$ | 0 |
| Inductancia [H/m] | $3,101 \cdot 10^{-4}$ | $3,101 \cdot 10^{-4}$ | $8,327 \cdot 10^{-4}$ |

Fuente: [6]

Como se puede apreciar en la tabla 1, los valores de la capacitancia son muy pequeños con relación a los demás parámetros eléctricos, por lo tanto, pueden ser despreciados sin caer en un mal planteamiento del modelo eléctrico.

Por otro lado la capacitancia en una línea de transmisión es el resultado de la diferencia de potencial entre los conductores y origina que ellos se carguen de la misma forma que las placas de un capacitor cuando hay una diferencia de potencial entre ellas. O sea, es la carga por unidad de diferencia de potencial. La capacitancia entre conductores paralelos es una constante que depende del tamaño y el espaciamiento entre ellos. Puesto que los conductores se encuentran enterrados no existe un espaciamiento suficiente entre ellos para generar una

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

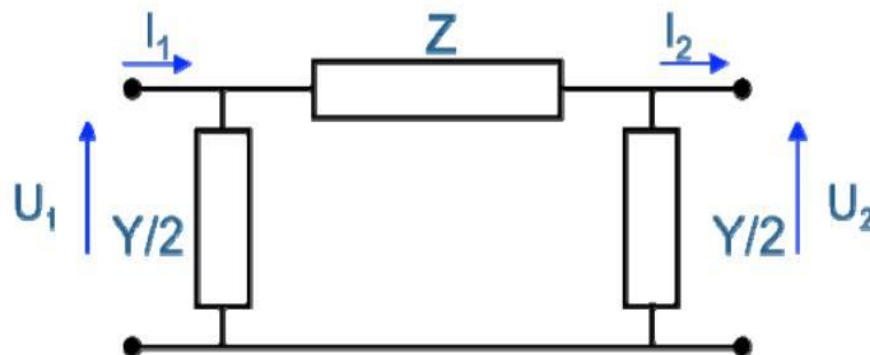


Universidad
Industrial de
Santander

diferencia de potencial considerable. Además, el efecto capacitivo se origina debido a las corrientes que se presentan entre conductores y entre estos y el suelo. Estas corrientes de desplazamiento hacen que los conductores se carguen cuando son energizados, aún con la línea en vacío. La capacitancia se desprecia normalmente para redes con longitud por debajo de 80 km. El efecto capacitivo se empieza a tener en cuenta en redes de longitud mayor a 80 km ya que éste se acentúa por el aumento de la corriente de desplazamiento[3]. El circuito tubería-cable de retorno presenta una longitud inferior a 2 km.

A continuación se muestra el diagrama del modelo π para una línea de transmisión aérea, como se puede observar en la figura 2:

Figura 2. Modelo π de una línea de transmisión aérea

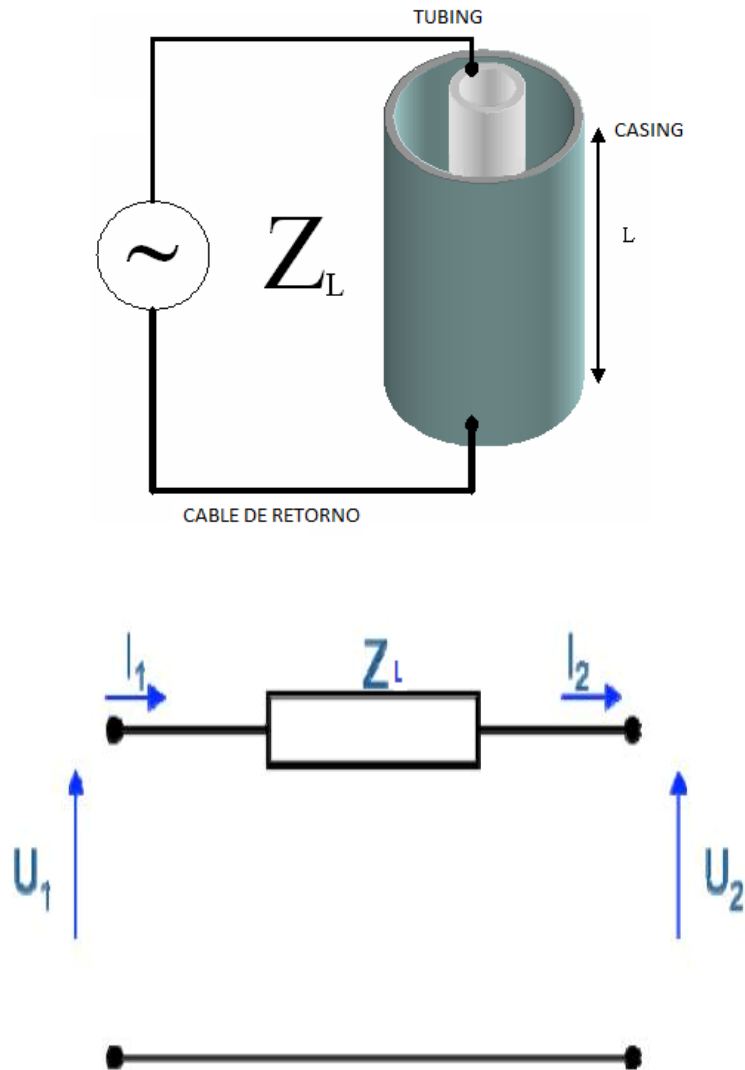


Fuente: [4]

El modelo π a usar en el proyecto despreciando el efecto capacitivo se observa en la figura 3:



Figura 3. Modelo π del circuito Tubería de Producción-cable de retorno.



Fuente: [4]

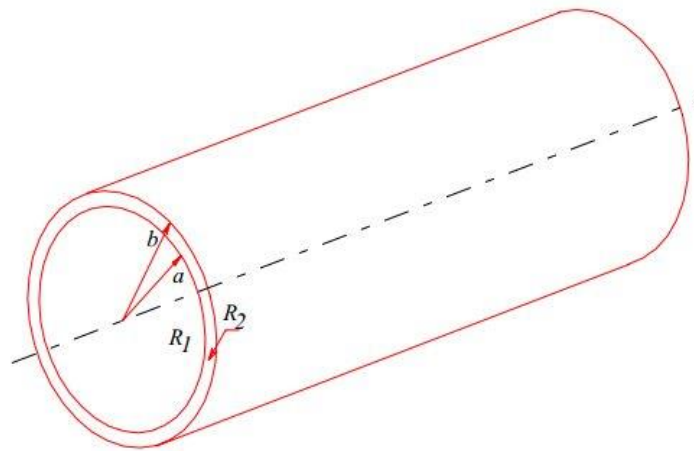
MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Para obtener el modelo eléctrico completo del sistema se hallan los parámetros correspondientes de la tubería y el cable de retorno por separado para posteriormente sumarlos.

1.4.1 Parámetros Conductor Cilíndrico Hueco En el desarrollo teórico, el tubo de producción (“tubing”) se modela como un conductor cilíndrico hueco, cuyos parámetros circuitales Resistencia (R) e inductancia (L) por unidad de longitud son calculados por las siguientes expresiones[5]:

Figura 4. Esquema cilindro hueco.



Fuente: [5]

$$R = \frac{1}{\sigma\pi(b^2 - a^2)} \text{ } [\Omega/m] \quad (1.1)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi(b^2 - a^2)} \left(\frac{a^4}{b^2 - a^2} \ln \left(\frac{b}{a} \right) + \frac{1}{4}(b^2 - 3a^2) \right) \text{ } [H/m] \quad (1.2)$$

Dónde:

b = radio exterior del “tubing” [m].

a = radio interior del “tubing” [m].

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

σ = conductividad del medio conductor (“tubing”- material ferromagnético).

μ_0 = permeabilidad del vacío.

El cálculo de los parámetros eléctricos se presenta en el anexo A.

1.4.2 Parámetros Conductor de Retorno Electrosomergible El conductor de retorno se encuentra en la zona del anular y no va a tener una participación directa en la transferencia de calor hacia el crudo ya que va a estar aislado eléctricamente del “tubing”. La función del cable de retorno es cerrar el circuito eléctrico permitiendo el paso de la corriente proveniente del “tubing”. Inicialmente, se consideró como conductor de retorno al “casing” de la tubería de producción pero a través de un análisis comparativo de conductividad y eficiencia se optó por utilizar un conductor de cobre con un revestimiento adecuado que posee mejor conductividad que el “casing” cuya composición es de acero. Esto se realiza basándose en el hecho de tener pérdidas eléctricas menores en el conductor de retorno eléctrico que en la tubería de producción, ya que este no interfiere de forma directa en el proceso de transferencia de calor al crudo.

La selección del conductor se realiza con base en un estudio anterior asociado al Campo Escuela Colorado en cuanto a la capacidad de potencia del mismo[6], la cual se halla establecida para un valor máximo de 100 [kVA] para un rango de tensión de salida de 0 – 1 [kV], frecuencia fija de 60 [Hz] y una corriente de salida entre 0 – 120 [A], dependiendo de la naturaleza de la carga requerida. En este orden de ideas, la selección del conductor es la del máximo calibre que se espera para la corriente de 120 [A] y se halla sujeta a cambios en la medida que sus especificaciones técnicas satisfagan las condiciones inherentes para cada tubería de producción y que garanticen finalmente el calentamiento por pérdidas eléctricas que se desea realizar[6].



Universidad
Industrial de
Santander

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Teniendo presente que la máxima corriente permisible en el cable de retorno es de 120 [A], se procede con la búsqueda y selección del calibre del conductor que se ajusta a dichas condiciones en el Código Eléctrico Colombiano (NTC – 2050), de la manera que se muestra en la tabla 2:

Tabla 2. Capacidad de corriente permisible en conductores aislados para 0 a 2000 V nominales y 60°C a 90°C. No más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o tierra (Directamente enterrados) y temperatura ambiente de 30°C

| Sección transv. | 60 °C | 75 °C | 90 °C | 60 °C | 75 °C | 90 °C | Calibre |
|-----------------|----------------|--|---|---|---|---|--------------|
| | TIPOS TW*, UF* | TIPOS FEPW*, RH*, RHW*, THHW*, THW*, THWN*, XHHW*, USE*, ZW* | TIPOS TBS,SA,SS,FEP*, FEPB*,MI,RHH*, RHW-2, THHN*, THHW*,THW-2*, THWN-2*, USE-2, XHH, XHHW*, XHHW-2, ZW-2 | TIPOS TW*, UF* | TIPOS RH*, RHW*, THHW*, THW*, THWN*, XHHW, USE* | TIPOS TBS,SA,SS, THHN*, THHW*, THW-2, THWN-2, RHH*, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2 | |
| mm ² | COBRE | | | ALUMINIO 0 ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE | | | AWG o kcmils |
| 0,82 | -- | -- | 14 | -- | -- | -- | 18 |
| 1,31 | -- | -- | 18 | -- | -- | -- | 16 |
| 2,08 | 20* | 20* | 25 | -- | -- | -- | 14 |
| 3,30 | 25* | 25* | 30* | 20* | 20* | 25* | 12 |
| 5,25 | 30 | 35* | 40* | 25 | 30* | 35* | 10 |
| 8,36 | 40 | 50 | 55 | 30 | 40 | 45 | 8 |
| 13,29 | 55 | 65 | 75 | 40 | 50 | 60 | 6 |
| 21,14 | 70 | 85 | 95 | 55 | 65 | 75 | 4 |
| 26,66 | 85 | 100 | 110 | 65 | 75 | 85 | 3 |
| 33,62 | 95 | 115 | 130 | 75 | 90 | 100 | 2 |
| 42,20 | 110 | 130 | 150 | 85 | 100 | 115 | 1 |
| 53,50 | 125 | 150 | 170 | 100 | 120 | 135 | 1/0 |

Fuente: Tomado textualmente de la NTC-2050, página 182

Cabe recalcar que el calibre 1 no es comercial en Colombia, por ello se elige el calibre 1/0, el cual es el inmediatamente más cercano que cumple para la corriente estipulada de 120 [A]. Luego, se resalta en el catálogo de cables electrosumergibles el calibre a utilizarse:

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Tabla 3. Catálogo de cable electrosumergible

| Número de producto | Calibre (AWG-kcmil) | Área de la sección transversal (mm ²) | Número de conductores | Diámetro del conductor (mm) | Espesor nominal del aislamiento (mm) | Diámetro nominal sobre aislamiento (mm) | Dimensión nominal alto (mm) | Dimensión nominal ancho (mm) | Número de conductores de tierra | Calibre del conductor de tierra (AWG-kcmil) | Área de la sección transversal del conductor de tierra (mm ²) |
|--------------------|---------------------|---|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|---|---|
| 210000028A | 14 | 2,08 | 3 | 1,98 | 1,14 | 4,34 | 7,61 | 20,63 | 1 | 14 | 2,08 |
| 210000029A | 12 | 3,31 | 3 | 2,49 | 1,14 | 4,85 | 9,20 | 23,74 | 1 | 12 | 3,31 |
| 21000000NA | 10 | 5,26 | 3 | 3,15 | 1,14 | 5,51 | 9,86 | 26,39 | 1 | 10 | 5,26 |
| 21000001TA | 8 | 8,37 | 3 | 3,95 | 1,40 | 6,83 | 11,18 | 31,66 | 1 | 8 | 8,37 |
| 21000001DA | 6 | 13,30 | 3 | 4,97 | 1,40 | 7,84 | 12,20 | 35,73 | 1 | 6 | 13,30 |
| 21000001EA | 4 | 21,15 | 3 | 6,25 | 1,40 | 9,12 | 13,48 | 40,85 | 1 | 4 | 21,15 |
| 21000001FA | 2 | 33,62 | 3 | 7,88 | 1,40 | 10,75 | 16,82 | 49,08 | 1 | 2 | 33,62 |
| 21000001UA | 1/0 | 53,50 | 3 | 9,93 | 1,65 | 13,31 | 19,37 | 59,29 | 1 | 1/0 | 53,50 |
| 21000001VA | 2/0 | 67,40 | 3 | 11,15 | 1,65 | 14,52 | 20,59 | 64,15 | 1 | 2/0 | 67,40 |

Fuente: [7]

La impedancia del conductor de retorno es constante ya que su diámetro no varía y la temperatura no cambia considerablemente, pues se ha seleccionado con el aislamiento adecuado para el ambiente de trabajo.

El conductor de retorno es un cable electrosumergible¹² y sus características se presentan a continuación[7]:

¹² Cable plano para alimentación de bombas electrosumergibles.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Figura 5. Cable plano para alimentación de bombas sumergibles pe+pvc 75 °c, 1 000 v con conductor de puesta a tierra y cubierta exterior de pvc.



Fuente: Condumex Cables

- Multiconductor.
- Forrado baja tensión.
- Norma nmx.
- Cable plano para alimentación de bombas sumergibles formado por tres conductores de fase flexibles de cobre suave clase i, aislamiento de polietileno de baja densidad (pebd) en colores negro, rojo y azul, (un color por fase), temperatura de operación de 75°C y tensión de operación de 1000V, un conductor de puesta a tierra flexible de cobre suave clase i, aislamiento de polietileno de baja densidad (pebd) en color verde, temperatura de operación de 75°C y tensión de operación de 1000V, reunidos de forma paralela, cubierta exterior de policloruro de vinilo en color negro (Tomado textualmente de [7]).



1.5 Modelo de Transferencia de Calor del Tubo de Conducción de Crudo por Efecto Joule[8]

Una vez que se ha desarrollado el modelo de impedancia eléctrica del sistema tubería de producción-cable de retorno, es de gran importancia realizar el modelo de transferencia de calor del proceso que contempla el paso de energía térmica desde el cuerpo de mayor temperatura (tubería de producción) al de menor temperatura (crudo), contemplando el comportamiento y propiedades del crudo, las propiedades de la tubería, la composición del revestimiento de la tubería y la composición del entorno rocoso (formación) para que a través de un balance de energía se planteen las ecuaciones de transferencia de calor en estado estable, suponiendo que el flujo de crudo está completamente desarrollado¹³, y que dicha transferencia es principalmente originada por el fenómeno de convección natural, por el cual se transfiere calor por medio del movimiento del fluido desde la tubería hacia el crudo.

Para estimar el proceso del calentamiento del crudo en la tubería de producción, se necesita realizar las siguientes suposiciones:

- El crudo en ascenso por la tubería se define como un fluido laminar, donde la velocidad del fluido es relativamente baja y no es perturbada por las posibles protuberancias del contorno. Además, la viscosidad es grande en comparación con la del agua, de manera que si por cualquier circunstancia se iniciase un fenómeno de turbulencia, la viscosidad lo destruiría.

¹³ Se entiende como flujo desarrollado aquel que tiene un perfil de velocidad constante a lo largo de la tubería.

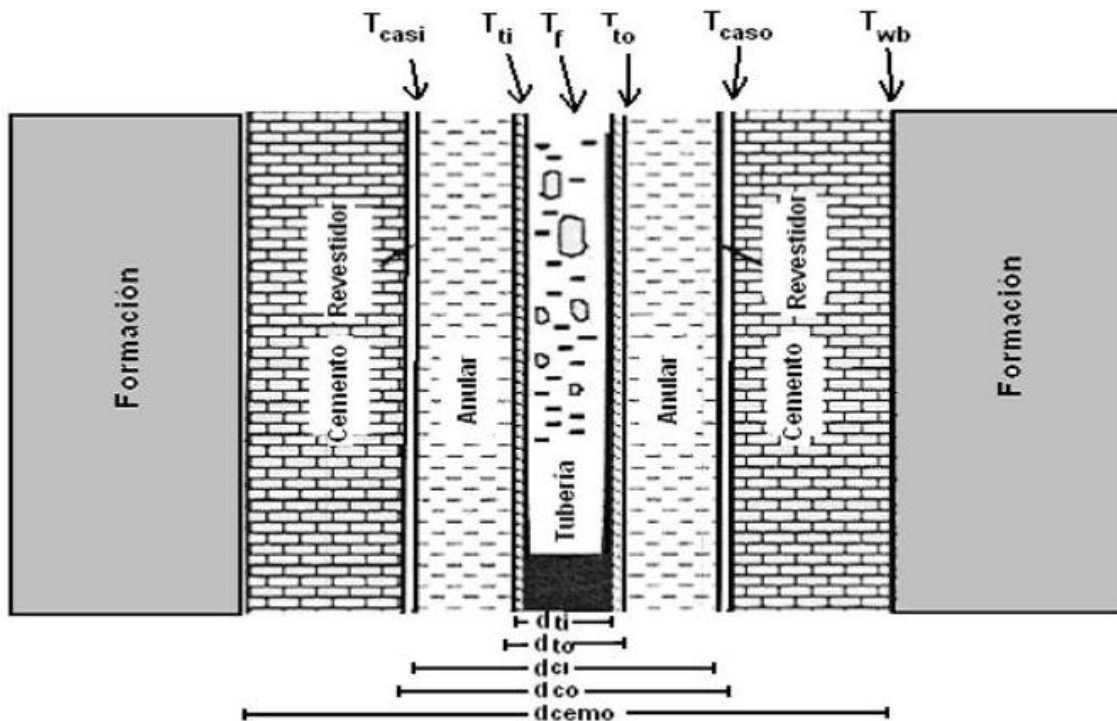
MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

- Otras consideraciones son: asumir que el crudo no cambia de fase durante el proceso, la conductividad térmica del tubo es constante y la capacidad calorífica del fluido no cambia en función de la temperatura[6].
- El flujo se supone completamente desarrollado y el análisis va a suponer que en el crudo se ha alcanzado un estado estacionario en cada corte transversal.



El modelo de transferencia de calor se realiza para el pozo COL-25 del Campo Escuela Colorado y su representación esquemática se muestra en la figura 5:

Figura 6. Representación esquemática pozo COL-25 Campo Escuela Colorado.



Fuente: [8]

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

T_{ti} : Radio interno de la tubería del pozo (“Tubing”).

T_{to} : Radio externo de la tubería del pozo (“Tubing”).

T_{casi} : Radio interno del revestimiento del pozo (“Casing”).

T_{caso} : Radio externo del revestimiento del pozo (“Casing”).

T_{wb} : Radio externo del revestimiento de cemento.

Según los principios termodinámicos el calor es la transferencia de energía entre diferentes cuerpos que se encuentran a distintas temperaturas y este flujo siempre ocurre desde el cuerpo de mayor temperatura hacia el cuerpo de menor temperatura.

El método del Calentamiento del Tubo de Conducción de Crudo por Efecto Joule sugiere un proceso de convección natural cuyo objetivo es imprimir por medio de pérdidas resistivas en la tubería de producción, energía—calórica al crudo e impedir que esta energía abandone en su mayoría al crudo para lograr la descomposición de los cúmulos de parafinas.

A partir de un balance de energía se analiza inicialmente el pozo con sus pérdidas de energía desde el flujo hacia la formación¹⁴ y posteriormente se analizará como a partir de este análisis, desarrollar el modelo de transferencia de calor del tubo hacia el flujo.

¹⁴ Tierra que rodea el pozo y se encuentra después del cemento revestidor.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

1.5.1 Transporte de Calor en la Formación Al introducir el concepto de transporte de calor en la formación en el subsuelo (arena, estrato, formación, etc), es importante recordar que el estudio de la distribución de temperaturas en la misma requiere un riguroso modelo que relacione la transferencia de calor en la interface pozo/formación, basadas en la conducción y convección de calor presentadas por Fourier y Newton respectivamente.

Cuando el petróleo se produce, la temperatura es aproximadamente la misma a la de la formación. Solamente cuando la caída de presión es muy grande se incrementará la temperatura debido al efecto Joule-Thompson[9]. Por el contrario puede mostrar enfriamiento si la caída de presión es muy pequeña. En cualquier caso la temperatura del fluido en la arena puede ser calculada desde el conocimiento de la temperatura de la formación y el efecto Joule-Thompson. Sin embargo, mientras el fluido sube por el pozo su temperatura es mayor que la de los alrededores debido al descenso de la temperatura de la tierra con la disminución de profundidad. La temperatura de formación cercana a la tubería también variará de alguna manera con el tiempo de producción. En consecuencia la pérdida de calor del fluido de producción disminuye con el tiempo[10].

1.5.2 Temperatura en la Formación Cuando un líquido es producido, su temperatura en la cara de la arena podría ser aproximadamente igual a la de la formación, puesto que conocer la temperatura a lo largo de la formación exigiría un estudio mucho más extenso. Mientras que esto no es verdad en los gases, la temperatura de entrada podría ser estimada utilizando la temperatura de formación si el efecto Joule-Thompson es tomado en cuenta de forma apropiada. Así la temperatura en el fondo del pozo del fluido producido podría ser estimada con menor margen de error. Además, a medida que el fluido va ascendiendo en

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

el pozo, su temperatura cambia a valores superiores en comparación con la temperatura atmosférica.

La diferencia de temperatura existente entre el fluido del pozo y la formación causa una transferencia de calor del fluido hacia los alrededores de la formación, originando una consecuente disminución de la temperatura del fluido a medida que la profundidad disminuye. A cualquier profundidad la temperatura de formación podría variar no solo a una distancia radial desde el pozo, sino que también con el tiempo de producción. Además, cuando se ha alcanzado un flujo continuo, puesto que el fluido es laminar se asegura una temperatura constante de fluido a cierta profundidad. De aquí que, la pérdida de calor del fluido disminuye con el tiempo y depende en las diferentes resistencias de flujo de calor entre el fluido caliente en la tubería y los alrededores de la formación.

Para derivar una expresión para la temperatura del fluido en función de la profundidad y del tiempo, primero establecemos la distribución de temperatura de la formación como una función de distancia radial y tiempo, dada una constante de flujo de calor del pozo. Un balance de energía¹⁵ en el fluido del pozo relacionará la temperatura del fluido con la interface formación/pozo y el flujo de calor, dado un coeficiente de calor en términos de la configuración del pozo en particular[10].

1.5.3 Distribución de Temperatura en la Formación En primera instancia, para modelar formalmente el flujo de calor hacia la formación se trata a esta como si fuese un sólido homogéneo, puesto que la difusión de calor en un sólido de tres dimensiones podría ser matemáticamente reducida a un problema

¹⁵ El balance de energía se realiza desde el fluido hasta la formación.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

de dos dimensiones, si se tiene en cuenta además la simetría axial presente alrededor de la fuente de calor como ocurre en el caso de un pozo productor. Durante la producción, el fluido en la tubería provee una fuente de calor a la formación. Luego, si se considera pequeño el incremento en la temperatura en la dirección vertical del pozo, se puede ignorar la contribución del gradiente de temperatura resultante, simplificando el problema a un sistema unidimensional de calor de difusión radial.

Para efectuar el análisis se realiza un balance de energía en la formación que conduce a una ecuación diferencial parcial, en coordenadas cilíndricas, para la variación de temperatura de formación con respecto a la distancia radial del pozo y el tiempo de producción.

Basado en la ecuación de difusividad¹⁶ aplicada a la conducción de calor se obtiene la siguiente ecuación diferencial que representa la conducción de calor en un cilindro largo. Esta ecuación se obtiene de un balance de energía sobre un cilindro, durante un pequeño intervalo de tiempo. El balance de energía se muestra a continuación:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Razón de} \\ \text{conducción} \\ \text{del calor en } r \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Razón de} \\ \text{conducción del} \\ \text{calor en } r + \Delta r \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{generación} \\ \text{de calor en} \\ \text{el interior del} \\ \text{elemento} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Razón} \\ \text{de cambio del} \\ \text{contenido} \\ \text{de energía del} \\ \text{elemento} \end{array} \right)$$

Se obtiene como resultado:

¹⁶ Tasa de cambio con que un material aumenta de temperatura, al ser puesto en contacto con una fuente de calor.



$$\frac{\partial^2 T_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_e}{\partial r} = \frac{C_e \rho_e}{k_e} \frac{\partial T_e}{\partial t} \quad (1.3)$$

En la ecuación (1.3), T_e es la temperatura de formación en una profundidad arbitraria en el tiempo (t) y la distancia (r) medida desde el centro de la tubería. La capacidad de calor (C_e), la densidad (ρ_e) y la conductividad (k_e). La ecuación de difusividad térmica es análoga a la ecuación de difusividad de presión utilizada para describir el flujo de un fluido en un medio poroso. Las tres condiciones que se necesitan para la solución de la Ecuación (1.3) se pueden obtener del examen del sistema físico y se muestran en la Ecuación (1.4), (1.5) y (1.6).

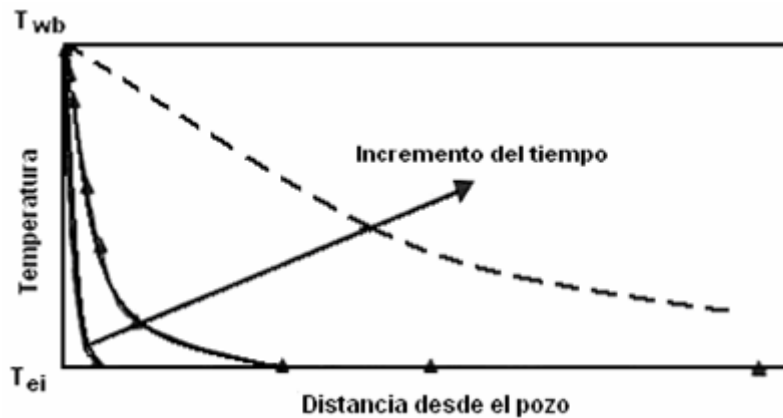
La figura 5 es un esquema de la distribución de temperatura en la formación alrededor de un pozo en producción a una profundidad dada. En poco tiempo la temperatura de formación retiene su valor inicial (T_{ei}) excepto cerca de la tubería como la muestra la curva más interna. Así inicialmente ($t = 0$) asumimos que $T_e = T_{ei}$ en cualquier lugar. Mientras que el tiempo aumenta, el calor transferido del fluido a la temperatura ambiente aumentará la temperatura de formación en las inmediaciones[10]. Los perfiles de temperatura de la formación evolucionarán, tendiendo a parecerse a la curva (punteada) medida en la figura 7:

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Figura 7. Esquema de un perfil de temperatura de formación a una profundidad dada alrededor del hoyo.



Fuente: [8]

Sin embargo, el límite de (T_e) no cambia con la distancia radial, es decir, la pendiente es cero ($dT/dr = 0$). Finalmente el índice de corriente de calor en la interfase pozo/formación es gobernada por la ley de la Conducción de Calor de Fourier[11], puesto que ésta genera consecuentemente las tres condiciones de frontera, las cuales son representadas por:

$$\lim_{t \rightarrow 0} T_e = T_{ei} \quad (1.4)$$

$$Q = 2\pi k_e \left. \frac{r \partial T_e}{\partial r} \right|_{r=r_{wb}} \quad (1.5)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial T_e}{\partial r} = 0 \quad (1.6)$$

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

En la ecuación (1.5), Q es la rata de flujo de calor desde la formación al pozo por unidad de longitud y (r_{wb}) es el radio exterior de la tubería.

Mientras que la producción continúa, la transferencia de calor desde la tubería causa un aumento gradual en la temperatura de formación de los alrededores, la cual a su vez causa una lenta disminución en el índice del flujo de calor.

1.5.4 Solución de la Ecuación de Difusividad La ecuación (1.3) es generalmente resuelta en términos de variables adimensionales (rD) y (tD) (distancia = r/r_{wd}) y $(tD = keTe /peCere)$. Hasan y Kabir[10] resolvieron la ecuación resultante con la Transformada de Laplace.

Para un conjunto similar de ecuaciones usadas para flujo no continuo, ellos expresaron la temperatura de formación como una función de la distancia radial y el tiempo, considerando respectivamente las condiciones de frontera expresadas a través de la Ley de Fourier.

Para calcular la temperatura del fluido fluyente, se necesitan la temperatura de formación y su derivada espacial en la interfase pozo/formación ($r_d=1$). Podemos escribir la expresión para la temperatura en la interfase pozo/formación (T_{wb}) mostrada en la ecuación (1.7) como:

$$T_{wb} = T_{ei} + \frac{Q}{\pi^2 k_e} I \quad (1.7)$$

donde:

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

♦ I es la integral definida en términos adimensionales, y es escrita como:

$$I = \int_0^{\infty} \frac{1 - e^{-u^2 t d}}{u^2} \frac{Y_1(u)J_0(u) - J_1(u)Y_0(u)}{J_1^2(u) + Y_1^2(u)} du \quad (1.8)$$

donde:

- ♦ J_0, J_1 : funciones de Bessel[12] de primer orden.
- ♦ Y_0, Y_1 : funciones de Bessel de segundo orden.

Análogo a las presiones adimensionales, P_d , usada en el análisis de las presiones transientes¹⁷, definimos la temperatura adimensional como la ecuación:

$$T_D \equiv -\frac{2\pi k_e}{Q} (T_{wb} - T_{ei}) \quad (1.9)$$

donde:

- ♦ k_e : conductividad de la formación (Btu/hr-ft-°F).
- ♦ Q : tasa de flujo de calor por unidad de longitud de la formación (Btu/hr-ft).
- ♦ T_{wb} : temperatura en la interfase pozo/formación (°F).
- ♦ T_{ei} : temperatura de la formación a condiciones iniciales (°F).

y al sustituir la ecuación (1.7) en la ecuación (1.9) de tal forma que:

$$T_D = -\frac{2\pi k_e}{Q} \left(T_{ei} + \frac{Q}{\pi^2 k_e} I - T_{ei} \right) \Rightarrow T_D = -\frac{2\pi k_e T_{ei}}{Q} - \frac{2I}{\pi} + \frac{2\pi k_e T_{ei}}{Q} \quad (1.10)$$

¹⁷ Presión transitoria o presión instantánea.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Así, $T_D = -2I/\pi$. Nótese que T_D es siempre positiva y, que ésta representa el flujo de calor de la formación hacia el pozo. Para el caso más usual de producción de fluidos, T_{wb} es mayor que T_{ei} , causando que el valor computado de (Q) sea negativo, lo cual significa que el fluido del pozo pierde calor a sus alrededores.

Usando las ecuaciones (1.7) hasta la (1.9) se requieren evaluaciones tediosas de una integral que involucra funciones de Bessel modificadas de cero y primer orden entre los límites de cero e infinito. Hasan y Kabir encontraron las siguientes expresiones algebraicas para temperaturas adimensionales, T_D en términos de tiempo adimensional para representar las soluciones bastante exactas.

$$T_D = \left[0,4063 + \frac{1}{2} \text{Ln } t_D \right] \left[1 + \frac{0,6}{t_D} \right], \text{ donde } t_D > 1,5 \quad (1.11)$$

$$T_D = 1,1281\sqrt{t_D}(1 - 0,3\sqrt{t_D}), \text{ donde } t_D \leq 1,5 \quad (1.12)$$

Las expresiones anteriores para T_D son discontinuas en $T_D = 1.5$. La expresión continua para T_D puede ser más adecuada en algunas aplicaciones y es escrita como:

$$T_D = \text{Ln} \left[e^{-0,2t_D} + (1,5 - 0,3719e^{-t_D})\sqrt{t_D} \right] \quad (1.13)$$

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

A largos tiempos ambas ecuaciones (1.11) Y (1.13) se reducen a la expresión:

$$T_D = 0,4063 + \frac{1}{2} \text{Ln } t_D \quad (1.14)$$

La ecuación (1.9) es una expresión conveniente que relaciona el calor y la fuerza de conducción de la diferencia de temperatura, ($T_{wb} = T_{ei}$) y permite cálculos de transferencia de calor con la ecuación (1.11) y debe ser reemplazada por la temperatura del fluido de la tubería. Esta sustitución de T_{wb} por T_f se logra al usar un balance de energía por el fluido de la tubería.

1.5.5 Balance de Energía para el Fluido en el Pozo La diferencia de temperatura entre el fluido del pozo y la formación da como resultado un intercambio de energía. Ramey logró un balance de energía para el fluido al suponer una corriente monofásica[10]. Dicha situación se muestra en la figura 7:

Figura 8. Balance de energía para el Fluido del Pozo.



Fuente: [8]

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

La figura 8 muestra un sistema de producción de una sola tubería, inclinada un ángulo (ω) a la horizontal, considerando un volumen de control de longitud (dz) a una distancia z desde el cabezal del pozo en este sistema, donde la distancia coordenada, z , es positiva en dirección descendente. La suma de calor ($wH|_{z+dz}$) entra al elemento ($z + dz$) por convección, mientras la conducción de calor desde la formación agrega presión al elemento.

Similarmente, ($wH|_z$) es el calor desde el elemento en z por convección. Agregando energía potencial y cinética a la energía de calor del fluido, obteniendo así:

$$\begin{aligned} wH|_{z+dz} + \frac{(z + dz)wgsin\omega}{Jg_c} + \frac{wv^2|_{z+dz}}{2Jg_c} + Qdz \\ = wH|_z + \frac{zwgsin\omega}{Jg_c} + \frac{wv^2|_z}{2Jg_c} \end{aligned} \quad (1.15)$$

donde:

- ◆ z : profundidad variable del pozo desde la superficie (pies).
- ◆ dz : volumen de control.
- ◆ $z wH$: suma de calor (BTU).
- ◆ w : flujo másico del fluido (libras/hr).
- ◆ g : aceleración de gravedad (pie/seg²).
- ◆ g_c : factor de conversión (32.17 (libra-pie/libra-seg²)).
- ◆ J : factor de conversión para el balance de energía.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

- ♦ Q: tasa de transferencia de calor por unidad de longitud (Btu/hr-pie).
- ♦ v: velocidad del fluido (pie/seg).

Durante la producción, cada término exceptuando la tasa (Q) en la ecuación (1.15), cambia de signo. Podemos generalizar la ecuación de balance de energía para los sistemas de producción como:

$$\frac{dH}{dz} + \frac{g \sin \omega}{Jg_c} + \frac{v}{Jg_c} \frac{dv}{dz} = -\frac{Q}{w} \quad (1.16)$$

Para un cambio de fluido no hay cambio de fase, es decir, cuando el calor se efectúa debido a la evaporación/condensación, la solución y la mezcla son insignificantes. La entalpía es una función de presión y temperatura y está dada de acuerdo a las relaciones termodinámicas de Maxwell por:

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T dp = C_p dT - C_j c_p dp \quad (1.17)$$

Donde:

- ♦ C_j representa el coeficiente Joule-Thompson.
- ♦ c_p es el medio con capacidad de calor del fluido a presión constante.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Al usar la ecuación (1.17) en la ecuación (1.16) podemos escribir la expresión para la temperatura del fluido de la tubería como una función de profundidad como:

$$\frac{dT_f}{dz} = C_j \frac{dp}{dz} + \frac{1}{c_p} \left[\pm \frac{Q}{w} - \frac{g \sin \omega}{J g_c} - \frac{v}{J g_c} \frac{dv}{dz} \right] \quad (1.18)$$

$$T_D \equiv -\frac{2\pi k_e}{Q} (T_{wb} - T_{ei}) \quad (1.19)$$

$$T_D = \text{Ln} \left[e^{-0,2t_D} + (1,5 - 0,3719e^{-t_D}) \sqrt{t_D} \right] \quad (1.20)$$

Combinando la ecuación (1.18) con las ecuaciones (1.9) y (1.20), podemos llegar a una expresión para T_f . Sin embargo, para eliminar T_{wb} de la expresión resultante se debe usar el coeficiente global de la transferencia de calor para el pozo.

1.5.5 Coeficiente de Transferencia de Calor para Pozos La transferencia de calor radial ocurre entre el fluido del pozo y los alrededores. Inicialmente la transferencia de calor se da entre la tubería y el fluido puesto que al aplicar la corriente eléctrica esta se convierte en fuente de calor hacia el fluido que posee un mayor coeficiente de convección. Una vez alcanzado un equilibrio termodinámico, la temperatura en el crudo será superior a la de la tubería debido al mayor almacenamiento de calor que posee el crudo y a la temperatura que recibe el mismo desde el fondo del pozo. Una vez que el crudo se vuelve fuente

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

de calor se da la transferencia superando resistencias ofrecidas por la pared de la tubería, aislamiento de la tubería, el revestidor, la pared del revestidor y el cemento como lo muestra la figura 17. Estas resistencias son en serie y excepto por el anular, el único mecanismo de transporte de energía es la conducción de la transferencia de calor.

En la Transferencia de Calor desde la tubería al fluido por Efecto Joule se está incrementando la energía térmica del crudo, por lo cual las pérdidas de calor en el balance de energía deben representar que el fluido del pozo gana mayor calor que el que pierde a sus alrededores. Anteriormente, se mencionó que “para el caso más usual de producción de fluidos, Twb es mayor que Tei, causando que el valor computado de (Q) sea negativo, lo cual significa que el fluido del pozo pierde calor a sus alrededores.”

En el proceso de Calentamiento del Tubo de Conducción de Crudo por Efecto Joule, el fluido que presenta una mayor capacidad de almacenamiento calórico debido a su coeficiente de transferencia de calor por convección y al fenómeno de difusión, está siendo calentado de forma externa a través de pérdidas resistivas que se transforman en calor, producto del paso de una corriente eléctrica por el “tubing”.

El “tubing” se encuentra rodeado o abrazado por un aislante usado en la industria petrolera para evitar fugas de crudo en las juntas de la tubería[13]. Para el proceso de transferencia de calor del tubo de producción al fluido, este aislante tendrá dos funciones adicionales que son las de brindar un aislamiento térmico-eléctrico a la tubería de producción, por lo cual se elige adecuadamente con el fin de soportar las condiciones de trabajo. Esto se referencia en el anexo B¹⁸.

¹⁸ En el Anexo B se selecciona el aislamiento térmico-eléctrico.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

La primera función, la de brindar un aislamiento térmico, es sumamente importante. El objetivo es reducir las pérdidas de calor del fluido por el proceso natural de transferencia de calor a través de las paredes de la tubería, hacia el anular, el revestidor, etc. y confinar esta energía calórica en su mayoría en el crudo para que solo se transfiera por convección en el mismo y lograr alcanzar la temperatura adecuada para la descomposición de los cúmulos de parafina. Las características térmicas y mecánicas del aislante reducen considerablemente las pérdidas de calor en la tubería y el fluido.

El modelo para la transferencia de calor tubería de producción-crudo se ha desarrollado teniendo en cuenta todas las partes que componen un pozo de producción y a través de las cuales se generan pérdidas de calor por conducción (pared de la tubería, aislamiento de la tubería, el revestidor, la pared del revestidor, el cemento y la formación). Este modelo es válido para el proceso de Calentamiento del Tubo de Conducción de Crudo por Efecto Joule puesto que se presentan pérdidas de calor dadas por las leyes de la termodinámica, aunque el aislante esté presente. La consideración que se tiene al aplicar el modelo es que la rata de flujo de calor desde el fluido a la formación por unidad de longitud disminuirá debido a la inyección constante de calor de la tubería al crudo y a la resistencia que ofrece el aislante de permitir su fuga¹⁹.

Por otro lado, puesto que se está energizando la tubería de producción existe un riesgo eléctrico que puede afectar al pozo y a los trabajadores que tienen contacto con este. Por ello, además del aislante rodeando al “tubing” existirán otro tipo de aisladores ubicados en el anular y en la superficie del pozo, estos propuestos en otra investigación[6] del Campo Escuela Colorado y mostrados a continuación en la figura 9.

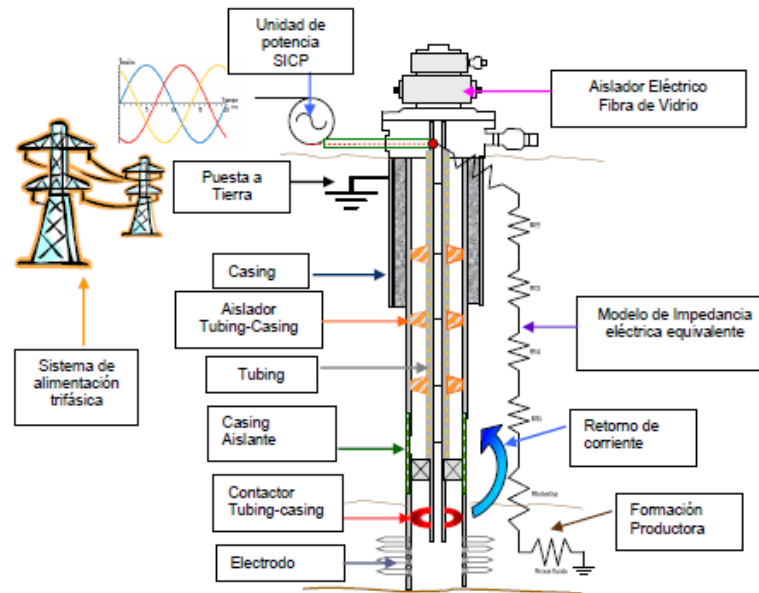
¹⁹ Esto se observa en la simulación del modelado de transferencia de calor de la tubería de producción realizada en PDEtool® (paquete de software de Matlab®) en el capítulo 3.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Figura 9. Tubería de producción con aislador tubing-casing y aislador eléctrico en fibra de vidrio.



Fuente: [6]

En estado estacionario, el índice de flujo de calor a través de una tubería por unidad de longitud del pozo (Q) puede ser expresado como:

$$Q = -2\pi r_{to} U_{to} (T_f - T_{wb}) \quad (1.21)$$

donde:

- ♦ U_{to} : coeficiente global de transferencia de calor de la tubería del pozo.
- ♦ r_{to} : radio externo de la tubería del pozo.
- ♦ $T_f - T_{wb}$: diferencia de temperatura entre el fluido en la tubería de producción y la interfase pozo/formación (pared).

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

De esta manera, el coeficiente global de transferencia de calor para un pozo dado es un parámetro importante. La transferencia de calor en estado estacionario nos permite derivar la expresión para el coeficiente global de transferencia de calor dada por:

$$\frac{1}{U_{to}} = \underbrace{\frac{r_{to}}{r_{fi} h_{to}}}_{1} + \underbrace{\frac{r_{to} \ln\left(\frac{r_{to}}{r_{fi}}\right)}{k_t}}_{2} + \underbrace{\frac{r_{to} \ln\left(\frac{r_{ims}}{r_{to}}\right)}{k_{ims}}}_{3} + \underbrace{\frac{r_{to}}{r_{ims} (h_c + h_r)}}_{4} + \underbrace{\frac{r_{to} \ln\left(\frac{r_{co}}{r_{ci}}\right)}{k_c}}_{5} + \underbrace{\frac{r_{to} \ln\left(\frac{r_{wb}}{r_{co}}\right)}{k_{cem}}}_{6}$$

(1.22)

donde:

- ◆ k_c : conductividad en el revestidor (BTU/(hr-pie-°F)).
- ◆ k_{cem} : conductividad del cemento (BTU/(hr-pie-°F)).
- ◆ k_t : conductividad entre el anular y el fluido de la tubería. (BTU/(hr-pie-°F)).
- ◆ k_{ims} : conductividad del aislante. (BTU/(hr-pie-°F)).
- ◆ h_{to} : coeficiente de transferencia de calor por convección de la tubería (BTU/(°F-hr-pie)).
- ◆ h_c : coeficiente de transferencia de calor por convección (BTU/(°F-hr-pie)).
- ◆ h_r : coeficiente de transferencia de calor por convección entre el anular y el fluido de la tubería (BTU/(°F-hr-pie)).
- ◆ r_{to} : radio externo de la tubería del pozo (pies).
- ◆ r_{co} : radio externo del revestidor (pies).

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

- ♦ rti: radio interno de la tubería del pozo (pies).
- ♦ rci: radio interno del revestidor (pies).
- ♦ rins: radio del aislante térmico (pies).
- ♦ rwb: radio del pozo (pies).

En el programa asociado al proceso de Calentamiento del Tubo de Conducción de Crudo por Efecto Joule y desarrollado en Matlab®²⁰, los datos anteriores se manejan en el Sistema Internacional de Medidas.

Al derivar la expresión del coeficiente global de transferencia de calor cada término en su ecuación representa los elementos presentes en un pozo específico, es decir, como se encuentra constituido dicho pozo. Entre los términos descritos por la ecuación (1.22) podemos nombrar:

- ♦ Término 1: representa la tubería presente en el pozo.
- ♦ Término 2: representa el espacio anular en el pozo.
- ♦ Término 3 y 4: representa las características del aislante en el pozo.
- ♦ Término 5: representa las condiciones del revestidor en el pozo.
- ♦ Término 6: representa las características del cemento utilizado.

1.5.6 Pérdida de Calor en la Formación Podemos escribir la expresión para TD (ecuación (1.9)) dada por[10]:

$$T_D \equiv -\frac{2\pi k_e}{Q} (T_{wb} - T_{ei}) \quad (1.9)$$

²⁰ En el código desarrollado en Matlab® se realiza la conversión de unidades al Sistema Internacional –SI.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

en transferencia de calor desde la formación a la interfase de pozo/ formación como la ecuación:

$$Q \equiv -\frac{2\pi k_e}{T_D} (T_{wb} - T_{ei}) \quad (1.23)$$

donde:

- ◆ k_e : conductividad de la formación (Btu/hr-ft-°F)
- ◆ Q : tasa de flujo de calor por unidad de longitud de la formación (Btu/hr-ft)
- ◆ T_{wb} : temperatura en la interfase pozo/formación (°F)
- ◆ T_{ei} : temperatura de la formación a condiciones iniciales (°F)

Combinando las ecuaciones (1.21) y (1.23) para eliminar T_{wb} tenemos lo siguiente[10]:

$$T_f + \frac{Q}{2\pi r_{to} U_{to}} = T_{ei} - \frac{QT_D}{2\pi k_e} \Rightarrow T_f - T_{ei} = -\frac{QT_D}{2\pi k_e} - \frac{Q}{2\pi r_{to} U_{to}}$$

$$\Rightarrow T_f - T_{ei} = -\frac{QT_D r_{to} U_{to} - Qk_e}{2\pi k_e r_{to} U_{to}} \Rightarrow (T_f - T_{ei}) 2\pi k_e r_{to} U_{to} = -Q(T_D r_{to} U_{to} + k_e)$$

$$Q = -2\pi \frac{k_e r_{to} U_{to}}{(T_D U_{to} r_{to}) + k_e} (T_f - T_{ei})$$

Obtenemos la ecuación:

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

$$Q \equiv -L_R w c_p (T_f - T_{ei}) = -\frac{w c_p}{A} (T_f - T_{ei}) \quad (1.24)$$

donde L_R es el parámetro llamado longitud de relajación y está definido por la ecuación[10]:

$$L_R \equiv \frac{2\pi}{c_p w} \left[\frac{r_{t0} U_{t0} k_e}{k_e + (r_{t0} U_{t0} T_D)} \right] \quad (1.25)$$

nótese que el parámetro L_R , es inverso del parámetro A , el cual es definido por Ramey como la ecuación[10]:

$$A \equiv \frac{c_p w}{2\pi} \left[\frac{k_e + (r_{t0} U_{t0} T_D)}{r_{t0} U_{t0} k_e} \right] \quad (1.26)$$

Podemos ver que la expresión para L_R contiene propiedades térmicas de la formación y el pozo. También incluye la función de temperatura adimensional, T_d , la cual varía con el tiempo. Sin embargo, T_d es una función débil de tiempo, especialmente en los tiempos finales. Consecuentemente la suposición de la constante L_R es conveniente en muchas aplicaciones prácticas. El coeficiente global de transferencia de calor para el sistema de tubería puede variar con la profundidad del pozo debido al cambio de configuración del pozo. Adicionalmente, como sugiere la Ecuación de Balance de Materiales, la convección natural en el espacio anular puede contribuir significativamente en el valor de U . La diferencia de temperatura, que es la fuerza impulsora de la

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

convección natural, varía con la profundidad del pozo, causando que LR sea una función de la profundidad. Sin embargo, la variación de LR con profundidad es pequeña y generalmente ignorada por que Uto aparece en el numerador y denominador de la (Ec. 1.26). La suposición de LR constante tiene importantes consecuencias para la solución de la ecuación diferencial que representa la temperatura del fluido en el pozo.

Así, se tiene la ecuación del modelo transferencia de calor del pozo de producción que alberga cada uno de los elementos involucrados en el proceso de transferencia de calor y la cual debido a las unidades que presenta permite deducir que es análoga en el sector eléctrico a la potencia eléctrica, la misma que se calculará para las diferentes temperaturas requeridas en el pozo de producción para descomponer los cúmulos de parafinas. La potencia eléctrica se calculará y aplicará en un proceso de corrección, a través del cual se alcanzará la temperatura de fusión para descomponer las parafinas ya existentes en el fluido y las paredes de la tubería y posteriormente se aplicará en un proceso preventivo alcanzando la temperatura de cristalización en la cual existen pequeños grupos de cristales que anteceden la formación de los cúmulos de parafina. Con esto, se prevé un flujo continuo del crudo en la tubería.

De acuerdo con todo lo expuesto, se especifica el modelo de transferencia de calor para el sistema de calentamiento del tubo de conducción de crudo por Efecto Joule, el cual está dado por la ecuación (1.24) que contiene los propiedades características del crudo, la tubería de producción, el anular, el aislamiento, el cemento revestidor y la formación. Además, refleja en términos termodinámicos el equivalente de la potencia eléctrica que en definitiva es lo que se desea obtener a través del conocimiento de las temperaturas en el crudo y la formación.



2. ESTADO DEL ARTE.

El método de calentamiento del tubo de conducción de crudo por Efecto Joule se basa en investigaciones realizadas a lo largo de años basadas en el calentamiento eléctrico resistivo. En este capítulo se exponen los antecedentes históricos y técnicas disponibles para realizar calentamiento eléctrico resistivo para el mejoramiento del proceso de extracción de petróleo. Es así, como en la sección 2.1, se describen de manera cronológica los eventos que dieron inicio a la aplicación del campo electromagnético para realizar calentamiento en la industria del petróleo. También, se presentan algunos resultados de pruebas piloto en diferentes campos petrolíferos. Seguido, en la sección 2.2 y 2.3, se enuncia la descripción de las diferentes técnicas de calentamiento electromagnético, incluyendo la de calentamiento resistivo, técnica seleccionada para realizar el proceso de calentamiento en la tubería. Posteriormente, en la sección 2.4, se mencionan dos casos comerciales de calentamiento para tubería.

2.1 Antecedentes Históricos

La utilización de los sistemas eléctricos para mejorar los procesos de producción de crudos en la industria del petróleo se remonta a finales de la década de los cincuenta y principios de la década de los sesenta. Este interés inusitado se debió principalmente al aumento exagerado en los

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

precios del petróleo convencional generado por una crisis energética desatada en esta época. Esta crisis condujo a la necesidad de recurrir a otras fuentes energéticas no convencionales, que en otros tiempos eran consideradas inviables económicamente, como es el caso de la explotación de los yacimientos de crudos altamente viscosos. Desde entonces hasta la fecha actual, se han desarrollado dispositivos basados en energía electromagnética, tales como: calentadores resistivos de fondo de pozo, calentadores inductivos, sistemas de calentamiento de alta frecuencia, entre otros. En general, todos los sistemas antes mencionados tienen como finalidad reducir la viscosidad del crudo para facilitar su recuperación.

El desarrollo de dichos dispositivos para estimular pozos de hidrocarburos pesados fue desarrollado por primera vez en California y en la Unión Soviética [14]. Hacia el año de 1969 el calentamiento eléctrico del yacimiento fue usado para mejorar la producción de crudo en un experimento realizado en Little Tom, el cual se reportó como exitoso. Como consecuencia, el método atrajo la atención de un gran número de investigadores e ingenieros, y otras pruebas de campo fueron reportadas en pocos años.

A comienzos de los años setenta las ondas electromagnéticas comenzaron a tomar cierta importancia en la industria petrolera, pues se empezó a estudiar la influencia que estas tenían sobre el petróleo crudo. Por otra parte, varios investigadores se dedicaron a evaluar el calentamiento eléctrico en la vecindad del pozo usando sistemas de calentamiento dieléctrico y sistemas de calentamiento resistivo, este último trabajando a una frecuencia de 60 Hz[14]. El primer trabajo académico sobre el proceso de calentamiento resistivo fue propuesto por El-Feky en 1977.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

El concepto de calentamiento eléctrico posteriormente fue acoplado al proceso de inyección de agua para derivar al método de calentamiento selectivo del yacimiento[15]. Sin embargo, debido a los bajos precios del petróleo después de ser superada la crisis en los años 70 y la falta de tecnología disponible, confino a este método a la espera indefinida a que los precios del crudo subieran y sobre todo a que se siguiera apoyando la investigación para encontrar nuevas tecnologías que permitieran la recuperación de crudo de una manera más eficiente.

2.2 Calentamiento Electromagnético

Al inicio de los ochenta, se utilizaron las ondas electromagnéticas para la recuperación de crudo, calentando el yacimiento por medio de la inducción de ondas en el medio poroso. Entidades como ARCO Y PETROCANADA probaron en forma individual sistemas de calentamiento eléctrico. Asimismo, el departamento de energía de los Estados Unidos y el Instituto de Investigación IIT probaron en forma exitosa el calentamiento con radiofrecuencias para yacimientos de aceite del oeste de Estados Unidos. En 1983 la compañía UENTECH junto con varios operadores condujo numerosos proyectos pilotos de sistemas de calentamiento eléctrico, lo que les permitió desarrollar nuevos equipos y técnicas para la aplicación de dicho método. Mediante los pilotos realizados se concluyó que los pozos candidatos a ser sometidos a dicho sistema de calentamiento son aquellos que presentan parafina, asfaltenos, sulfuros, hidratos y cualquier otro deposito sensible al calor[6].

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Una prueba de calentamiento resistivo de un solo pozo fue llevada a cabo por EOR²¹ International desde el 10 de noviembre de 1989 hasta agosto de 1990 en el pozo SCH-280 del yacimiento Bentheim perteneciente al campo Schoonebeek en los Países Bajos. Antes de la estimulación, la producción de crudo fue de 82 bbl/día con un corte de agua del 35%. Cuando se incrementó el suministro de potencia en superficie a 60 kW, se duplicó la tasa de producción de crudo. La temperatura de fondo de pozo estuvo en el rango de 54 a 60 grados centígrados en el “*casing*” a lo largo del electrodo[6].

Igualmente la empresa EOR International realizó pruebas de calentamiento eléctrico en dos pozos de crudo pesado en Lloydminster (A1-11-48-25 W3M: Lashburn y A8-6-51-27: Northminster) para la compañía Canada Northwest Energy Limited en el período 1989 – 1990. Aunque las pruebas fallaron debido a problemas de producción de arena y daños en el sistema de entrega de energía, hubo una respuesta positiva en la producción obtenida a través de la estimulación del calentamiento eléctrico. Los proyectos piloto (Northminster y Lashburn) tuvieron razones de aumento de producción de 1,27 y 3,75 respectivamente. Ambos proyectos indicaron una rápida respuesta al calentamiento aun a bajos niveles de entrada de potencia.

En la actualidad, varias empresas petroleras investigan en el área, no obstante, sus resultados no son publicados debido a que la información es catalogada como confidencial. Sin embargo, es de esperarse que países como Canadá y Venezuela, lideren proyectos de investigación y desarrollo en técnicas de calentamiento de pozo, pues en estas dos naciones se concentran más del 90% de las reservas de crudos altamente parafínicos en

²¹ Recuperación Mejorada del Petróleo –EOR por sus siglas en inglés.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

el mundo. Finalmente, y para terminar con los antecedentes históricos, se presenta de manera resumida en la tabla 3, las diferentes investigaciones ordenadas cronológicamente con sus respectivos resultados y sitios de prueba[6].

Tabla 4. Síntesis de los antecedentes históricos: Consumo promedio de potencia vs. Incremento en la producción de petróleo

| No | Fecha | Operador | Sitio de la | Descripción del | Resultados |
|----|-------|---------------------|-----------------------------|---|--|
| 1 | 1985 | Uentech Corporation | Ardmore, Oklahoma | Calentamiento resistivo de baja frecuencia. Crudo muy viscoso con gravedad API 6 – 15. Se perforaron varios pozos de observación de temperatura en un rango de 4 a 15 pies (1,22 a 4,57 m) del pozo de prueba. El | Se inició con una temperatura de 18-20 °C (291,15 – 293,15 K). La temperatura a los 3 pies (0,91 m) aumentó a más de 105 °C (378,15 K) en 40 días de calentamiento. En un pozo a 15 pies (4,57 m) se notó una temperatura de 40 °C (313,15 K) luego de 160 días. |
| 2 | 1988 | Mazzei | Frog Lake 11D-15-56-3 W4M | Calentamiento resistivo de baja frecuencia usando 30 | Incremento en la producción de 2-3 veces |
| 3 | 1989 | CNW ²² | Northminster A8-6-51-27-W3M | Calentamiento resistivo de baja frecuencia usando 40 | Relación de estimulación de 1.27 |
| 4 | 1989 | NAM-Holland | Schoonebeck 280 | Calentamiento resistivo de baja frecuencia usando 60 | Incremento en la producción desde 82 hasta 195 bbl/día (31 m ³ /d) |
| 5 | 91-98 | CNW-Canadá | Lashburn A1-11-48-25-W3M | Mezcla de calentamiento resistivo y calentamiento por "tubing". Potencia: 30-50 kW | El calentamiento del yacimiento dió una relación pico de estimulación de 3.75, mientras el calentamiento del "tubing" produjo sólo un |
| 6 | 91-98 | Petrobras | Rio-Panon Field | Calentamiento multipozo del yacimiento. Potencia | Se reportó una duplicación de la producción promedio. |
| 7 | 1997 | CNRL-Canadá | St. Paul, Alberta | Calentamiento inductivo | Incremento de producción de 1.5 veces |

Fuente: [14]

²² Cánada Northwest Energy.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad Industrial de Santander

Tabla 4.(Continuación)

| | | | | | |
|----|--------------|---------------------------|-----------------------|--|--|
| 8 | 1998a actual | Renaissance | Campo Jenner, Alberta | Calentamiento inductivo Potencia promedio: 30 kW | Disminución mínima en el corte de agua |
| 9 | 1998-99 | AEC-Alberta | Pelican | Calentamiento inductivo del pozo | No exitoso |
| 10 | 1998 | Ranger Oil | Elk Point | Calentamiento inductivo. Potencia promedio: 20 kW | Incremento mínimo |
| 11 | 1998-2001 | Bahrain Petroleum Company | Bahrain Oilfield | Calentamiento inductivo. Potencia: 5-8 kW | Se triplicó la producción |

Fuente: [14]

2.3 Métodos de calentamiento electromagnético

Los métodos de calentamiento electromagnéticos se pueden clasificar de acuerdo a la forma de generación de calor. Un parámetro que juega un papel importante en la forma en que la energía eléctrica y la electromagnética se convierten en calor, es la frecuencia. Tomando como parámetro de clasificación la frecuencia de la señal empleada, los métodos de calentamiento electromagnético pueden dividirse en tres grupos [16]:

- Calentamiento a alta frecuencia (radiofrecuencia y microondas) 10MHz – 300GHz.
- Calentamiento electromagnético o inductivo 100kHz – 10MHz.
- Calentamiento a baja frecuencia (óhmico o resistivo). También se conoce como calentamiento eléctrico 0Hz – 100KHz.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

2.3.1 Calentamiento de Alta Frecuencia En este tipo de calentamiento se emplean corrientes de rotación presentes en procesos de alta frecuencia. El calentamiento a alta frecuencia trabaja dentro del rango de radiofrecuencia (10-100 MHz) y microondas (300 MHz-300 GHz). El principio de esta forma de calentamiento es el siguiente: Los dipolos de las moléculas se encuentran alineados con el campo eléctrico. El crudo se encuentra compuesto por agua y otro tipo de sustancias apolares que permiten la aplicación del método. Cuando este campo se altera, los dipolos sufren un movimiento rotatorio a una velocidad proporcional a la frecuencia de alteración. Este movimiento molecular abrupto hace que se genere fricción entre las moléculas y por ende se genera calor a una tasa considerable. En la medida que aumenta la frecuencia, crecerá la agitación molecular y por consiguiente, mayor es la transformación de la energía electromagnética en energía térmica por fricción intermolecular. En tal caso, el calentamiento es instantáneo, independiente de las características térmicas del medio. El método es altamente dependiente de la frecuencia utilizada, de la intensidad del campo eléctrico de excitación y de la permisividad compleja del medio. Este fenómeno se conoce también como calentamiento dieléctrico.

La constante dieléctrica es un parámetro que define la propiedad dieléctrica de los materiales y es ampliamente empleado en las investigaciones de calentamiento electromagnético. Ésta describe la habilidad de las moléculas para ser polarizadas por el campo eléctrico. A bajas frecuencias este valor puede alcanzar un máximo, como la máxima cantidad de energía que se puede almacenar en un material. Las pérdidas dieléctricas miden la eficiencia con la cual la energía de radiación electromagnética puede ser convertida en calor[16].

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

En resumen, las temperaturas alcanzadas por las herramientas utilizadas en este tipo de calentamiento, son bastante elevadas y dependientes de la frecuencia, pero esto contrasta con su reducido radio de acción, comparadas con las herramientas de calentamiento resistivo.

Figura 10. Herramientas de calentamiento por radiofrecuencia.



Fuente: [17]

2.3.2 Calentamiento Electromagnético Inductivo Este tipo de calentamiento debe su principio a las corrientes de Eddy y pérdidas por histéresis en la tubería de producción o “tubing” y en el tubo de revestimiento o “casing” o en el revestimiento del pozo conocido como liner. Estas corrientes inducidas en la tubería ocasionan pérdidas eléctricas considerables y por consiguiente el incremento de temperatura. Sin embargo, estos sistemas implican la instalación de inductores adheridos al fondo del “tubing” o tubo de producción, además, no fluye corriente hacia el yacimiento. El sistema utiliza el

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

“cable de retorno” como un elemento conductor de calor a la zona de producción que rodea el pozo. Los pozos candidatos para la aplicación de calentamiento por inducción incluyen[18]:

- Pozos con problemas de daño en la cara de la formación (problemas de deposición).
- Yacimientos de crudo pesado inmóvil que necesitan un precalentamiento antes de aplicar otro proceso de recobro mejorado.
- Crudos con viscosidad mayor de 50 Cp²³.
- Yacimientos con baja saturación de agua connata²⁴
- Pozos horizontales donde hay necesidad de expandir o extender la longitud efectiva del pozo.
- Pozos verticales con bajas tasas de producción.
- Pozos existentes donde solamente se pueden bajar las herramientas de calentamiento[6].

2.3.3 Calentamiento Eléctrico Resistivo Este método consiste en utilizar como medio conductor (línea de transmisión) al tubo de producción o “tubing” para inyectar corriente a baja frecuencia hacia la cara del pozo o directamente hacia la tierra del sistema por medio del cable de retorno que cierra el circuito eléctrico. Como efecto del método, la energía eléctrica se transforma en energía calórica mediante las pérdidas óhmicas asociadas a la tubería de producción y la formación. El efecto global de la generación de calor es la reducción de la caída de presión cerca de la cara del pozo gracias a la disminución de la viscosidad, mejorando la movilidad del crudo. Una lista de

²³ El poise es la unidad de viscosidad dinámica del sistema cegesimal de unidades. Cp son las siglas del centipoise.

²⁴ Connata: Agua de origen natural presente en el yacimiento y en la mezcla de crudo

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

condiciones convenientes para que el calentamiento resistivo sea efectivo se muestra a continuación:

- Yacimientos de crudo pesado donde no se puede emplear el vapor debido a varias razones tal como la profundidad del yacimiento o escasa posibilidad de inyectar vapor.
- Yacimientos donde modestas cantidades de calor producirán cambio significativo en la producción.
- Yacimientos con capas de hielo permanente o que tienen fracturas o ranuras de alta permeabilidad.
- Yacimientos de crudo pesado en calizas²⁵.
- Crudos con gravedad $^{\circ}\text{API} < 20$ grados.
- Espesor de la zona productora de 2 metros o mayor.
- Producción primaria²⁶ de crudo sin estimulación de 30 BPD/pozo o mayor.
- Resistividad de la formación de 30 ohm-metros o mayor.
- Viscosidad de crudo de 100 Cp o mayor.

El proceso de inyección de corriente presenta las siguientes características: Es un proceso continuo, el calentamiento eléctrico ocurre simultáneamente con la producción de los fluidos del yacimiento. Además, todo el equipo requerido para calentar la vecindad del pozo puede instalar dentro del mismo, empleando un equipo convencional de campo. Tampoco, hay necesidad de inyectar fluidos extraños dentro del yacimiento, ya que estos fluidos inyectados dentro del yacimiento pueden reducir la permeabilidad relativa al aceite o pueden causar daño a la formación. Para ilustrar de manera más concreta las diferencias de los dos métodos más utilizados para

²⁵ La caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio

²⁶ Cuando el petróleo surge naturalmente, impulsado por la presión del gas o el agua de la formación, o bien por la succión de una bomba.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

realizar calentamiento electromagnético (resistivo-inductivo), se presenta a continuación la tabla 5:

Tabla 5. Diferencias entre el método inductivo y el método resistivo.

| Característica | Método inductivo | Método Resistivo |
|------------------------------------|-------------------------------------|---|
| | Requiere la | Es recomendable el uso |
| Fuente del calentamiento eléctrico | Corrientes inducidas en el "casing" | Calentamiento resistivo en el yacimiento |
| Requerimientos de | 10 a 40 kW | 20 a 80 kW |
| | | |
| Sistema de | 3 fases, baja corriente, | Una sola fase, alta |
| | La herramienta de inducción puede | Localización permanente. Se aplica solamente en |

Fuente: [14]

2.4 Sistemas de calentamiento electromagnético

En general, hay una tendencia a desarrollar equipos portátiles con el objeto de cubrir grandes áreas en cortos períodos de tiempo con un único equipo y con esto evitar el gran costo en el que habría que incurrir para montar un sistema de calentamiento de yacimiento permanente. También se

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

destaca la utilización de configuraciones de calentadores inductivos con bastante frecuencia a partir de la acogida del método. A continuación se enunciarán algunos equipos con sus características principales, los cuales han sido utilizados en investigaciones basadas en el uso de calentadores de fondo de pozo. Esta revisión de prototipos, confrontará el sistema de calentamiento de la tubería de producción por Efecto Joule con los sistemas que se han desarrollado en la industria en los últimos años:

- **Calentador eléctrico de fondo de pozo patentado por Pershing**

En la década de los años 20 se patentaron aplicaciones que estaban enfocadas a la remoción de las obstrucciones en la tubería (específicamente de parafinas). El sistema, expuesto por Pershing, se explica claramente en la patente 1464618 de los Estados Unidos, en ella se argumenta el uso de un cable para sostener un dispositivo calentador; Tal dispositivo se compone de un número de núcleos o celdas que van dentro de una coraza protectora y todas estas celdas de poder están conectadas a una fuente de corriente en la superficie. En la figura 11 se muestra un esquema de este dispositivo.

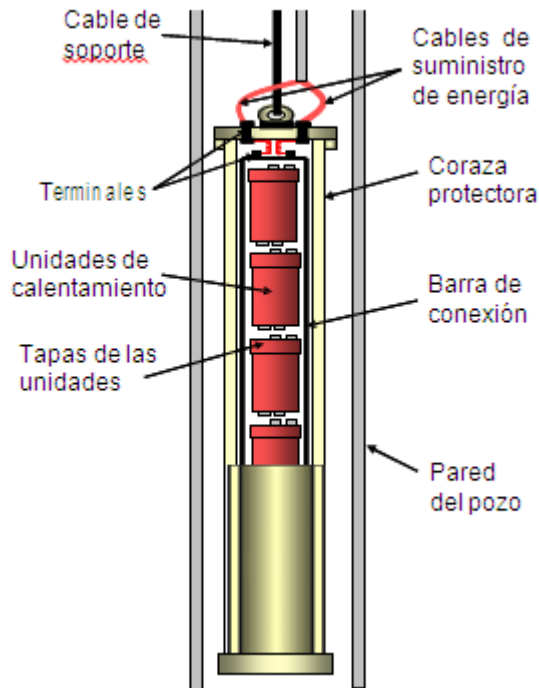
Las celdas o unidades de calentamiento están conectadas unas con otras, pero si una celda falla o se requiere remover algunas de las unidades no se romperá el circuito debido a que cada celda está también conectada independientemente a la fuente de energía a través de la barra de conexión. El receptáculo en el que se depositan las unidades de calentamiento así como sus partes principales generalmente se fabrican en cobre, debido a que éste tiende a entregar la máxima cantidad de calor recibida de la fuente de energía[19].

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Figura 11. Vista lateral del calentador patentado por Pershing suspendido dentro del pozo



Fuente: [20]

- **Dispositivo de calentamiento patentado por Stegemeier**

En Abril de 1960 Stegemeier presenta, en la patente número 2932352 de la Oficina de Patentes de los Estados Unidos, un aparato calentador de pozos usando un medio de transferencia líquido para conducir calor desde un elemento eléctricamente resistivo hacia las superficies que rodean el aparato. Se compone de un conducto central que en su parte superior está unido a una sarta de tubería. La parte inferior del conducto esta provista de un número de ranuras por las cuales entraría el petróleo para ser bombeado (ver figura 12); si se desea, el calentador también se puede colocar en alguna

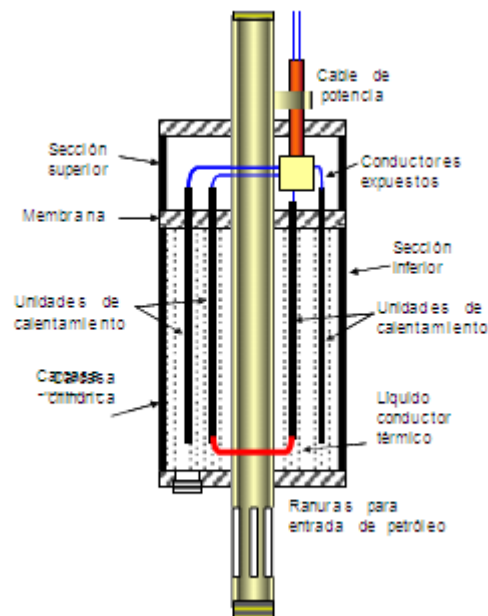
MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

parte intermedia de la sarta de tubería y en este caso la parte inferior del conducto se uniría con la parte inferior de la sarta. El anular del dispositivo calentador se divide por una membrana en una sección superior relativamente corta y una sección inferior de mayor tamaño. La sección inferior se rellena con un fluido. Este fluido puede estar conformado por una mezcla de partículas sólidas refractarias conductoras de calor y un líquido conductor de calor. Las unidades de calentamiento toman la forma de barras en forma de “U” que se posicionan simétricamente alrededor del “tubing”. Las unidades consisten de un conductor eléctrico recubierto por una capa de óxido de magnesio comprimido u otro mineral aislante el cual a su vez está cubierto por una capa metálica[21].

Figura 12. Vista lateral del dispositivo de calentamiento patentado por Stegemeier.



Fuente: [22]



- **Aparato de calentamiento patentado por McCarthy**

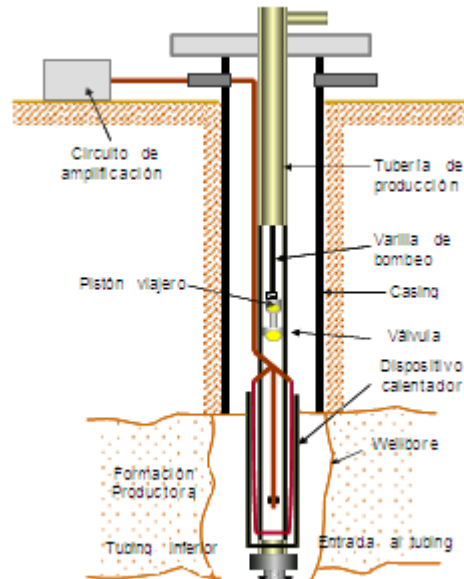
En 1963 McCarthy, en la patente número 3114417 de la Oficina de Patentes de los Estados Unidos (Figura 13), se discute el uso de un aparato en fondo de pozo, específicamente de ciertos calentadores de superficie adaptados para instalarse en la cara del pozo con el fin de calentar el fluido producido de esta zona. La corriente se conduce a través de un cable eléctrico dispuesto frente a la cara del pozo; dicho cable no se somete a las altas temperaturas a las que estaría operando el calentador y de esta forma se evita el deterioro del cable y de su aislante evitándose un corto circuito. Este aparato está diseñado para operar en pozos en los cuales se tiene un diseño con revestimiento hasta el tope de la zona de interés. El dispositivo calentador se coloca en posición uniéndolo a una sarta de tubería pasando a ser parte de esta. La tubería puede estar unida a un sistema de levantamiento mecánico con todas las partes que lo componen. Este sistema usa corriente directa. El dispositivo calentador consta de una camisa alrededor del “tubing” de producción de modo que se forma un anular en el cual se colocan las unidades resistivas de calentamiento. Estas unidades constan de un cable resistivo dispuesto dentro de un tubo que generalmente se fabrica en acero inoxidable. La herramienta calentará el aceite en el “wellbore” que rodee la coraza del calentador mediante transmisión del calor desde el cable resistivo del interior de las unidades de calentamiento[23].

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Figura 13. Sección longitudinal del aparato de calentamiento patentado por McCarthy instalado en el pozo



Fuente: [24]

- **Aparato de calentamiento patentado por Bridges**

En 1991 Bridges, presenta la patente N° 509918 en la Oficina de Patentes de Canadá (Figura 14). En ésta se presenta el uso de una fuente de poder controlada por corriente para calentar el crudo en la zona de producción. Este sistema conduce la corriente a través del tubo de producción “*tubing*” o el “*casing*”, utilizándolos como línea de transmisión. El dispositivo opera inyectado corriente de baja frecuencia en la cara del pozo, y tiene como principio de operación utilizar el agua intersticial de la mezcla de crudo en la formación como medio conductor y generador de calor. Además, en la patente proponen varias configuraciones dependiendo del tipo de alimentación que se tenga y la configuración de pozos que se

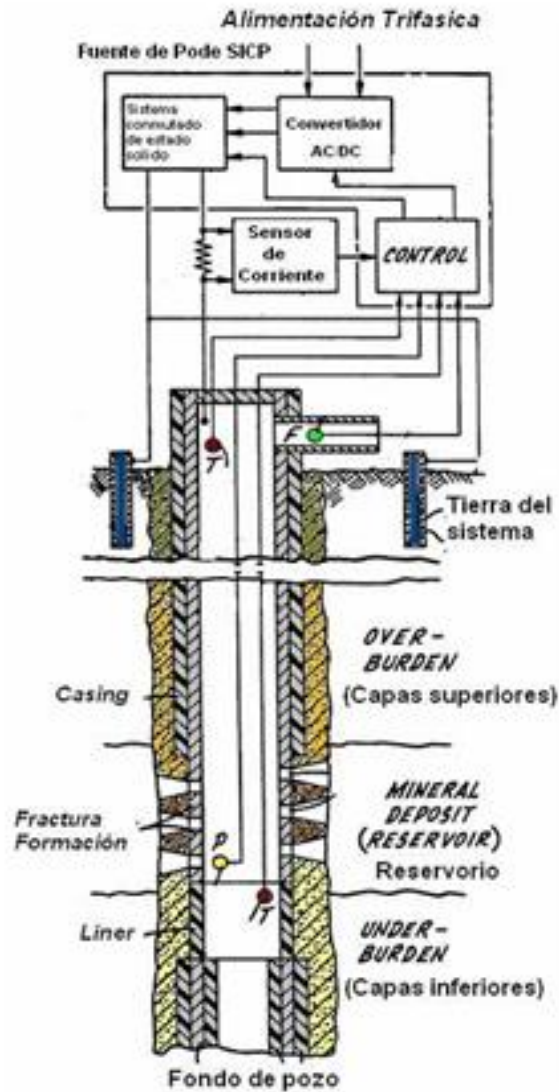
MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

desean interconectar. Un idea general los circuitos utilizados en el diseño es ilustrado en la figura 14 [6].



Universidad
Industrial de
Santander

Figura 14. Diagrama de bloques del sistema de inyección de corriente patentado por Bridges.



Fuente: [25]



2.5. Aplicaciones comerciales

En esta sección se presentaran dos equipos comerciales de empresas dedicadas al negocio del calentamiento electromagnético, en las cuales se evidencia el desarrollo tecnológico de la técnica hacia el calentamiento de tuberías.

- **Sistema de calentamiento en fondo de pozo desarrollado por Lynbrook Heating Technologies**

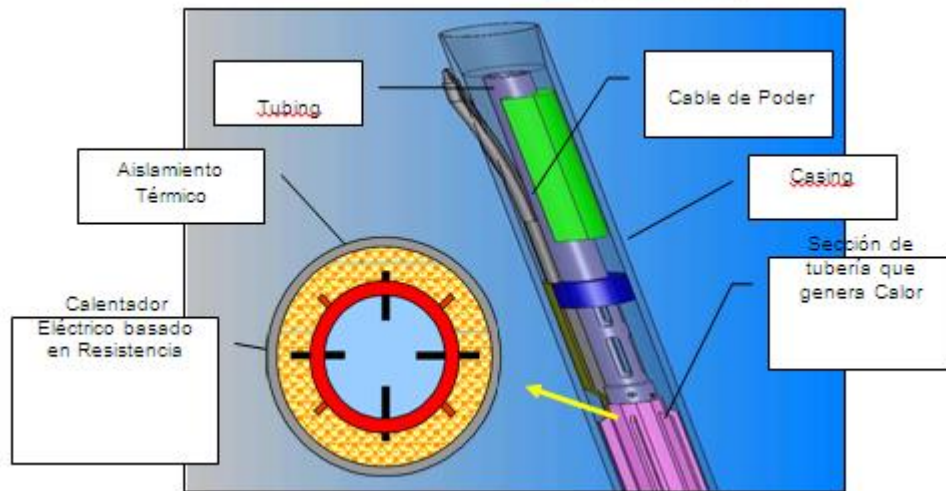
La empresa Lynbrook Systems de Houston Texas, construyo una herramienta especializada para realizar calentamiento de tubería en pozo. La cual tiene una capacidad de potencia de 35 kW hasta 75 kW para el “tubing” de 5-1/2” y para el “casing” maneja una potencia de 120 kW para el “tubing” de 7”. En general consiste en una sección de tubería con núcleo resistivo de alta disipación térmica acompañado de unas aletas de material metálico de alta conductividad térmica hacia el interior, conectado a un cable de potencia el cual provee la corriente necesaria para que sea efectivo el calentamiento, como se puede apreciar en la figura 15. Una de las ventajas de esta herramienta es que el calentamiento es centralizado en una sección a lo largo de la tubería, parámetro importante si se quiere evitar precipitación de parafinas en la tubería[26].

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Figura 15. Vista lateral e interior de la herramienta construida por Lynbrook Heating



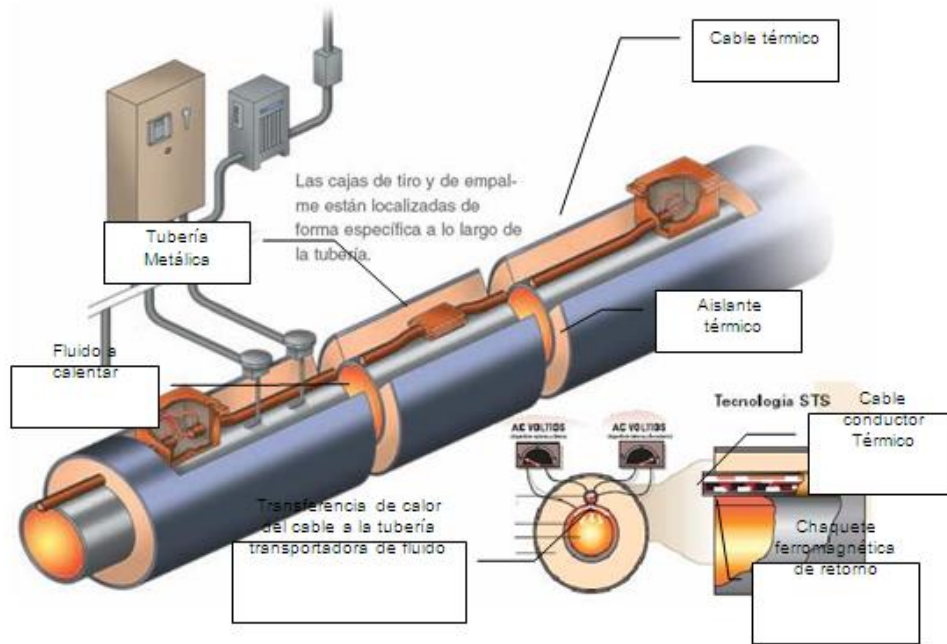
Fuente: Lynbrook Systems S.A.

- El “Tracer STS Skin-effect Sistema de Traceado Eléctrico” de la empresa Tyco Thermal Controls

El sistema “Tracer STS” es un sistema de gestión de calor, configurado para aportar calor en tuberías de media y larga longitud, en la figura 16 se puede apreciar la configuración del sistema. Las aplicaciones a las cuales puede utilizarse son las siguientes: líneas de transferencia de productos, fundición de nieve y hielo, calentamiento de tanques, líneas de transferencia submarina, entre otras. Trabaja a una potencia nominal de hasta 150 [W/m], temperaturas de mantenimiento de hasta 200°C, Temperaturas de exposición de hasta 250°C.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

Figura 16. Vista lateral e interior de la herramienta construida por Lynbrook Heating.



Fuente: Tyco Thermal Controls

En general, el sistema consta de un cable eléctrico aislado instalado dentro de una tubería de calentamiento ferromagnética unida a la tubería de transporte. El cable aislado está conectado a la fuente de tensión y a la tubería de calentamiento. Por tanto, la corriente fluye por el cable regresando por la superficie externa de la tubería. El sistema STS es eléctricamente seguro y produce calor en la tubería ferromagnética gracias al efecto de dos fenómenos eléctricos muy conocidos: Skin Effect (efecto de piel) y Proximity Effect (efecto de proximidad). El calor se genera también debido a la resistencia del tubo calefactor y del cable STS, y a través de corrientes de Eddy y de histéresis en la tubería calefactora. La tubería calefactora está fijada a la tubería de proceso y completamente integrada dentro del



Universidad
Industrial de
Santander

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

aislamiento térmico, el calor generado finalmente se transmite eficientemente a la tubería de proceso[27].



Universidad
Industrial de
Santander

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

SEGUNDA PARTE

PRUEBAS Y RESULTADOS



3. PRUEBAS Y RESULTADOS.

En el presente capítulo, se lleva a cabo la aplicación de la herramienta de software desarrollada para el análisis del pozo de producción seleccionado, con la finalidad de obtener la potencia eléctrica requerida para alcanzar y superar las temperaturas de cristalización y de fusión de las parafinas en el crudo. Como primera medida, se realiza la descripción del proceso de selección del pozo de Campo Escuela Colorado en la sección 3.1, especificando las pautas que se tomaron en cuenta para ello y resumiendo en tablas los parámetros técnicos y térmicos más relevantes del pozo escogido, seguido de una breve explicación de la acumulación de parafinas que presenta. Después, se abarca la simulación del modelo térmico previamente determinado para caracterizar, bajo ciertas condiciones de operación explicadas en la sección 3.2, la transferencia de calor presente entre el crudo y los demás elementos estructurales y medios físicos que conforman a la tubería de producción. Finalmente, se procede a la resolución de las ecuaciones diferenciales parciales implícitas en dicho modelo mediante su representación gráfica e interactiva en PDEtool® en la sección 3.3, en aras de constatar la variación de la temperatura resultante y su tiempo de ejecución.

3.1 Selección del pozo y descripción de la problemática

Conforme a lo descrito por E. Ariza [11], para llevar a cabo la selección preliminar de un pozo adecuado, sujeto a pruebas de muestreo del Campo Escuela Colorado, se realiza un análisis comparativo entre los pozos activos y de aquellos que posiblemente sean funcionales por su registro histórico de producción,

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

teniendo en cuenta aspectos tales como estado mecánico, producción, vías de acceso y condición actual. Luego, se verifica la presencia de piezas mecánicas o demás elementos que obstruyan el muestreo en la profundidad total del pozo. Los resultados de dicha caracterización se expresan como tablas en el anexo C, señalando a los pozos COL-25 y COL-64 como los más idóneos.

El pozo del Campo Escuela Colorado seleccionado como caso de estudio por simulación de datos en la referente temática corresponde al pozo COL-25, el cual actualmente se halla en un estado apto para reiniciar su operación puesto que presenta una obstrucción por parafinas moderada y un deterioro mecánico leve en su instalación, y del que se cuenta adicionalmente con suficiente material bibliográfico que soporta su análisis en contraste con el pozo COL-64. Por ende, las variables involucradas en el modelo contemplado se referencian teniendo en cuenta las dimensiones y propiedades químicas inherentes a dicho pozo.

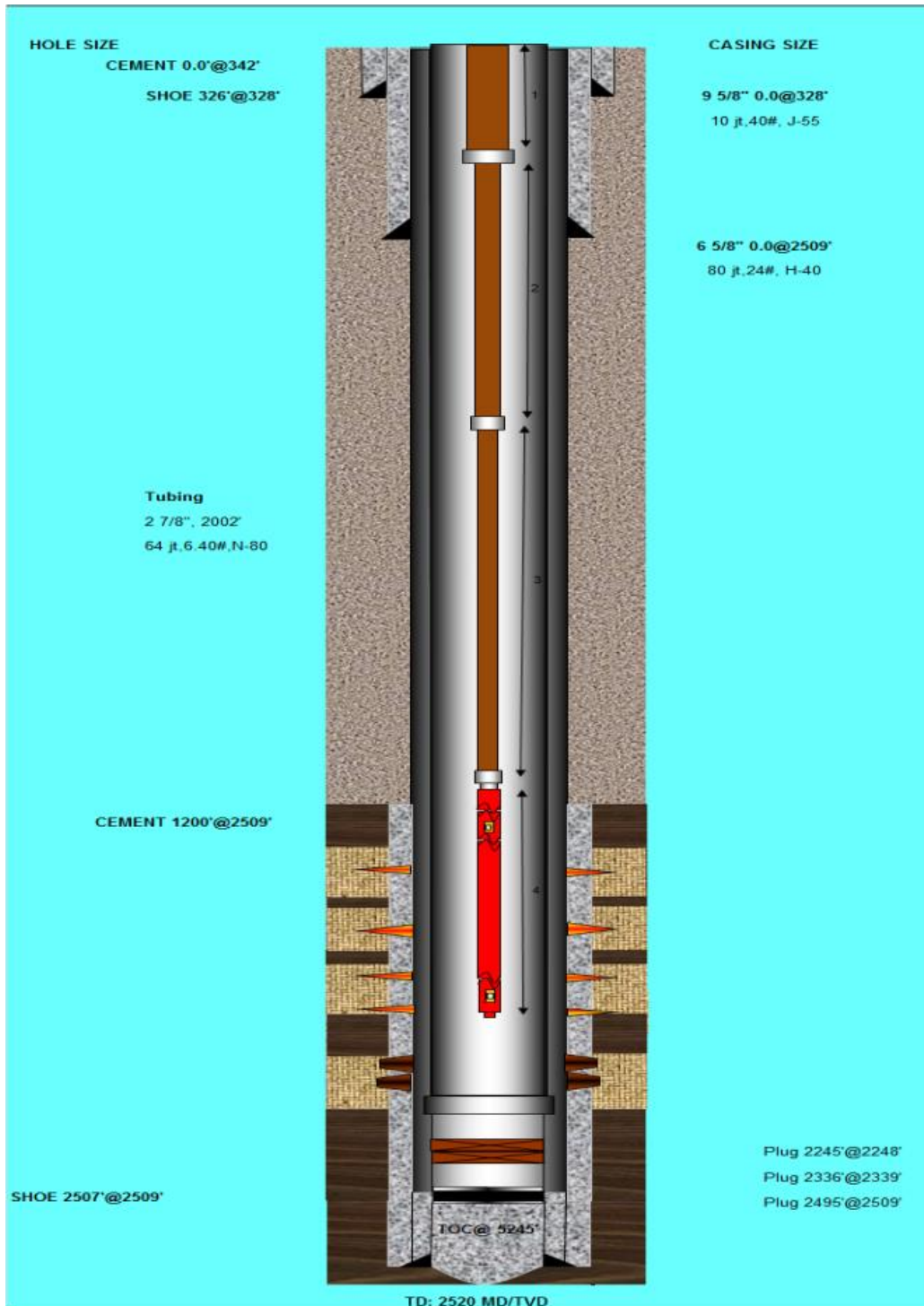
Se presentan consignadas en la tabla 3 las dimensiones propias del pozo, y por aparte, ilustraciones de su disposición física en las figuras 17,18 y 19:

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad Industrial de Santander

Figura 17. Perfil mecánico del pozo COL-25.



Fuente: [28]



Figura 18. Vía de acceso al pozo COL-25.



Fuente:[1]

Figura 19. Cabeza del pozo COL-25



Fuente: [1]

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad Industrial de Santander

Tabla 6. Dimensiones del pozo COL-25

| DIMENSIONES DEL POZO COL-25 – CAMPO ESCUELA COLORADO | |
|---|--------------------|
| PROFUNDIDAD TOTAL [ft] | 2520 (768,09 [m]) |
| LONGITUD TOTAL DEL “TUBING” [ft] | 2181 (664,76 [m]) |
| DIÁMETRO TOTAL DEL POZO | 8 5/8” (0,2190[m]) |
| DIÁMETRO EXTERNO DEL “CASING” | 6 5/8” (0,1682[m]) |
| DIÁMETRO INTERNO DEL “CASING” | 6,049” (0,1535[m]) |
| DIÁMETRO EXTERNO DEL “TUBING” | 2 7/8” (0,073[m]) |
| DIÁMETRO INTERNO DEL “TUBING” | 2,259” (0,057[m]) |

Fuente: [28]

Por otro lado, también se tienen en cuenta parámetros asociados a la naturaleza térmica del crudo, del revestimiento de aislamiento y de los elementos que hacen las veces de medios involucrados en la transferencia de calor a través del pozo de producción tales como lo son el acero en el que se hallan forjadas las tuberías (“tubing” y “casing”), el aire en el anular, el cemento del revestimiento exterior y la formación circundante (Tierra), datos registrados en las tablas 7, 8 y 9 respectivamente:

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Tabla 7. Parámetros generales del crudo del pozo COL-25

| PARÁMETROS GENERALES DEL CRUDO DEL POZO COL – 25 (2000 Psia) – CAMPO ESCUELA COLORADO | |
|--|-------------------|
| CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/m*°K] | 0,116 |
| DENSIDAD [kg/m ³] | 768 |
| CALOR ESPECÍFICO PROMEDIO [J/kg*°K] | 1884 |
| CAUDAL [m ³ /h] | 0,06624 (10 BOPD) |
| FLUJO MASICO [kg/h] | 50,87232 |
| TEMPERATURA DE CRISTALIZACIÓN [°C] | 32 (90°F) |
| TEMPERATURA DE FUSIÓN [°C] | 112 (234°F) |

Fuente: [1]

Tabla 8. Dimensiones y propiedades térmicas del aislamiento térmico escogido

| PROPIEDADES DEL AISLAMIENTO TÉRMICO (FIBRA DE VIDRIO) | |
|--|-----------------|
| DIAMETRO INTERIOR | 3" (0,076 m) |
| DIAMETRO EXTERIOR | 4,5" (0,1143 m) |
| CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/m*°K] | 0,034 |
| DENSIDAD [kg/m ³] | 220 |
| CALOR ESPECÍFICO [J/kg*°K] | 795 |

Fuentes: [13], [29]

**MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL
CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE**



Universidad
Industrial de
Santander

Tabla 9. Propiedades térmicas generales de los medios físicos del pozo COL-25

| PROPIEDADES TÉRMICAS GENERALES | |
|--|-----------------------|
| CEMENTO | |
| CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/m*°K] | 1,047 |
| DENSIDAD [kg/m ³] | 3200 |
| CALOR ESPECIFICO PROMEDIO [J/kg*°K] | 880 |
| TUBERÍA DE ACERO | |
| CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/m*°K] | 50 |
| COEFICIENTE CONVECTIVO PROMEDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR [W/m ² *°K] | 40 |
| EMISIVIDAD | 0,96 |
| DENSIDAD [kg/m ³] | 7850 |
| CALOR ESPECIFICO PROMEDIO [J/kg*°K] | 460 |
| AIRE (ANULAR) | |
| CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/m*°K] | 0,026 |
| DENSIDAD (A 50°C Y 1 ATM) [kg/m ³] | 1,09 |
| VISCOSIDAD (A 50°C) [Pa*s] | 1,95*10 ⁻⁵ |
| CALOR ESPECÍFICO PROMEDIO J/kg*°K | 1000 |
| COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA 1/°K | 3,32*10 ⁻³ |
| TIERRA (FORMACIÓN) | |
| CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/m*°K] | 1,5 |
| DENSIDAD [kg/m ³] | 5550 |
| CALOR ESPECÍFICO (A 25°C Y 1 ATM) [J/kg*°K] | 1046 |

Fuentes: [30], [29], [31], [32], [33], [34]

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Entrando en materia, la problemática ligada al pozo COL-25 radica en el depósito de cristales de parafina de las paredes interiores del “tubing”, causado por el descenso paulatino de la temperatura del crudo en la medida que fluye desde el fondo de dicho pozo hacia la superficie, haciéndose más notoria a profundidades cercanas a la superficie del mismo donde se registran temperaturas inferiores al punto de cristalización (32°C – 90°F) tal como se describe en la tabla 10:

Tabla 10. Variación del punto de cristalización de la parafina del pozo COL-25 con relación a la presión, temperatura del fluido y profundidad

| Profundidad (pies) | Presión (psia) | Temperatura del fluido (°F) | Temperatura de cristalización (°F) |
|--------------------|----------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 0 | 14,49 | 84,32 | |
| 86 | 15,09 | 84,81 | 90 |
| 140 | 15,11 | 84,81 | |
| 234 | 22,76 | 85,12 | |
| 350 | 49,54 | 85,12 | |
| 483 | 79,63 | 85,12 | |
| 617 | 118,87 | 85,12 | |
| 770 | 163,69 | 85,20 | |
| 918 | 210,94 | 85,30 | |
| 1077 | 260,51 | 85,40 | |
| 1237 | 314,79 | 85,50 | |
| 1394 | 369,23 | 87,19 | 90 |
| 1554 | 423,29 | 89,28 | |
| 1716 | 477,66 | 91,45 | |
| 1870 | 531,74 | 93,60 | 90 |
| 2007 | 587,62 | 95,98 | |
| 2130 | 641,52 | 98,26 | |
| 2185 | 699,79 | 100,08 | 105 |
| 2185 | 754,67 | 101,00 | |
| 2185 | 805,00 | 104,00 | |
| 2185 | 804,80 | 104,00 | |
| 2185 | 805,00 | 104,00 | |
| 2185 | 805,00 | 104,00 | |
| 2185 | 805,00 | 104,00 | |
| | | | 130 |

Fuente: [1]

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Esta tabla muestra que existe una relación directa entre la profundidad del pozo (Primera columna) y la temperatura del crudo (Tercera columna), ratificando la problemática planteada.

Luego, el suministro de corriente eléctrica al “tubing” en su totalidad le confiere la cualidad de comportarse como una fuente activa de calor al tener lugar en éste la transformación de energía eléctrica en térmica (Pérdidas por Efecto Joule), las cuales, en últimas, afianzan una mejor producción del pozo al disminuirse la concentración de parafinas, situación que es susceptible de optimizarse al emplear un aislamiento que recubra al “tubing” destinado a restringirlo térmica y eléctricamente, confinando así la transferencia de calor generado con respecto a las demás estructuras involucradas, además de protegerlo de posibles descargas por diferenciales de potencial eléctrico.

Una vez declaradas las variables empleadas y las circunstancias en las que se halla el pozo de producción, se procede en las siguientes secciones con la simulación numérica y gráfica del modelo térmico, discriminando en él el uso o no de aislamiento.

3.2 Simulación numérica del modelo térmico de la tubería de un pozo de producción

El propósito primordial de la simulación numérica del modelo térmico de una tubería de producción de un pozo en particular consiste en determinar la energía térmica requerida para garantizar que se alcance las temperaturas de cristalización o de fusión de las parafinas a lo largo del “tubing” de acuerdo al tipo de mantenimiento que se desee poner en acción, sea preventivo o correctivo. A

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

su vez, dicha energía resultante permitirá establecer los parámetros eléctricos del conductor que servirá de vía de retorno a la corriente circulante que se encuentra induciendo calentamiento por Efecto Joule, cerrando efectivamente el circuito eléctrico con la fuente de alimentación.

Cabe destacar que para esta etapa se desarrolló un algoritmo *Ad hoc*²⁷ en el entorno de programación Matlab®, que se presenta a manera del anexo C , cuya descripción va de acorde a las ecuaciones planteadas en el marco teórico para el cálculo de los parámetros asociados al modelo de transferencia de calor del pozo y la ejecución contempla específicamente la información técnica del pozo COL-25 y los datos previamente consignados en las tablas 6 a 8 para los medios físicos involucrados en el mismo.

Para efectos prácticos de la simulación misma, las condiciones de operación del pozo se expresan en régimen transitorio, considerando al crudo como un fluido laminar que expresa uniformidad en sus propiedades sin importar su dirección de desplazamiento (Isotropía), a que no hay cambio en su estado físico (Una sola fase) y a que presenta una consistencia y propiedades térmicas similares a las de las parafinas. Mientras que con respecto al yacimiento como tal, la tendencia en las temperaturas analizadas en la tabla 10 permite considerar una variación térmica lineal, facilitando promediar sus respectivos valores.

La tabla 11 recopila los resultados arrojados por la simulación, al reemplazar los datos de las tablas 7 a 9 en las fórmulas previstas para los coeficientes de calor por convección y radiación presentadas por Hasan y Kabir [11]. De igual manera se procede con la ecuación 1.22, teniendo ahora presente los valores calculados

²⁷ Ad hoc hace referencia en este contexto a que el código fue desarrollado específicamente para el pozo COL-25.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

de los anteriores coeficientes, para así determinar los valores del coeficiente global de transferencia de calor ante la presencia o no de aislamiento, según corresponda la situación:

Tabla 11. Coeficientes térmicos obtenidos a partir de la simulación numérica

| COEFICIENTES TÉRMICOS - TRANSFERENCIA DE CALOR - SIMULACIÓN | |
|--|--------|
| COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN EN EL ANULAR (CON AISLAMIENTO) [$W/m^2 \cdot ^\circ K$] | 1,6282 |
| COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN EN EL ANULAR (SIN AISLAMIENTO) [$W/m^2 \cdot ^\circ K$] | 1,8213 |
| COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN EN EL ANULAR [$W/m^2 \cdot ^\circ K$] | 0,0057 |
| COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR (CON AISLAMIENTO) [$W/m^2 \cdot ^\circ K$] | 1,0951 |
| COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR (SIN AISLAMIENTO) [$W/m^2 \cdot ^\circ K$] | 1,70 |

Rigiéndose por el principio cero de la Termodinámica, los coeficientes de transferencia de calor por convección y por radiación designan la rata de transmisión de calor entre el crudo y el anular a través del “tubing”. Mientras que

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

el primero depende intrínsecamente de la relación entre fluidos (Crudo y Aire), el segundo no requiere de un medio físico para su propagación. Se observa que para este caso en particular dicha transmisión de calor es poco significativa debido a que los valores obtenidos para ambos coeficientes son muy pequeños comparados con el crudo que presenta una mayor afinidad térmica que el aire, al ser este último un elemento aislante de forma natural.

Por su parte, el coeficiente global de transferencia de calor hace referencia a la variación en la transferencia de calor radial que tiene lugar entre el crudo y la formación (Tierra), modelando a los diversos medios restantes que componen a un pozo como resistencias térmicas. Para este parámetro, los valores calculados ponen en manifiesto la conveniencia de adjuntar un revestimiento de aislamiento al “tubing” para reducir pérdidas de calor hacia otras secciones no deseadas, mejorando así sustancialmente el calentamiento inducido al crudo por Efecto Joule.

En la parte final de la simulación numérica del modelo térmico del pozo se estima la potencia expresada en Watts que se debe suplir para la longitud total de la tubería de producción, para así asegurar que todo el crudo se halle a una temperatura deseada, para propósitos de esta tesis las relacionadas al punto de cristalización y el punto de nube de las parafinas.

La tabla 12 muestra las potencias calculadas a partir de la ecuación 1.24. Éstas son necesarias para que en la tubería de producción sean puestos en marcha tanto un mantenimiento preventivo como uno correctivo de precipitación y acumulación de parafinas en el pozo COL-25, recalcando la variación resultante de los valores de éstas ante la instalación o no del aislamiento:

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Tabla 12. Potencias calculadas para alcanzar las temperaturas de cristalización y fusión de las parafinas.

| POTENCIAS CALCULADAS PARA EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE - SIMULACIÓN | | | |
|---|--|--|--------|
| PUNTO DE CRISTALIZACIÓN DE LA PARAFINA (90°F ~30°C) | | | |
| POTENCIA REQUERIDA (CON AISLAMIENTO) [kW] | | | 1,3027 |
| POTENCIA REQUERIDA (SIN AISLAMIENTO) [kW] | | | 1,995 |
| PUNTO DE FUSION DE LA PARAFINA (234°F ~112°C) | | | |
| POTENCIA REQUERIDA (CON AISLAMIENTO) [kW] | | | 11,724 |
| POTENCIA REQUERIDA (SIN AISLAMIENTO) [kW] | | | 17,955 |

Como se puede apreciar en dicha tabla, las potencias determinadas para el punto de cristalización se encuentran dentro de un rango normal de demanda eléctrica posible de satisfacer en términos de costos por el cable conductor, aislamiento y suministro energético. Esta situación se debe a que al rango de temperaturas de la formación en condiciones iniciales del pozo se halla cercano a la temperatura deseada. En contraposición, el punto de fusión condiciona a que se reestructure completamente la capacidad térmica y amperimétrica de la estructura eléctrica adjunta para adecuarse a las condiciones de operación impuestas, resultando no viable económicamente hablando a corto plazo.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

La aplicación de potencias eléctricas con valores mucho mayores que los propuestos para cada caso en particular, acelerarían el proceso reduciendo el tiempo empleado, aumentando drásticamente la temperatura en la tubería de producción en detrimento de su integridad[35] y la de los equipos, incrementándose los procesos de corrosión y los de costos de operación. Por el contrario, muy bajas potencias, hacen muy lento el proceso de calentamiento para el dinamismo presente en la industria del petróleo, trayendo como consecuencia la reducción de la producción de los pozos.

3.3 Simulación gráfica del modelo térmico de la tubería de un pozo de producción

Concluida la simulación numérica del modelo térmico se prosigue a describirlo gráficamente en el paquete interactivo de PDEtool®, incluido en el entorno de programación de Matlab®, en aras de darle solución conjunta a las ecuaciones de calor para cada uno de los diferentes medios físicos que intervienen en de un pozo de producción expresadas como ecuaciones diferenciales.

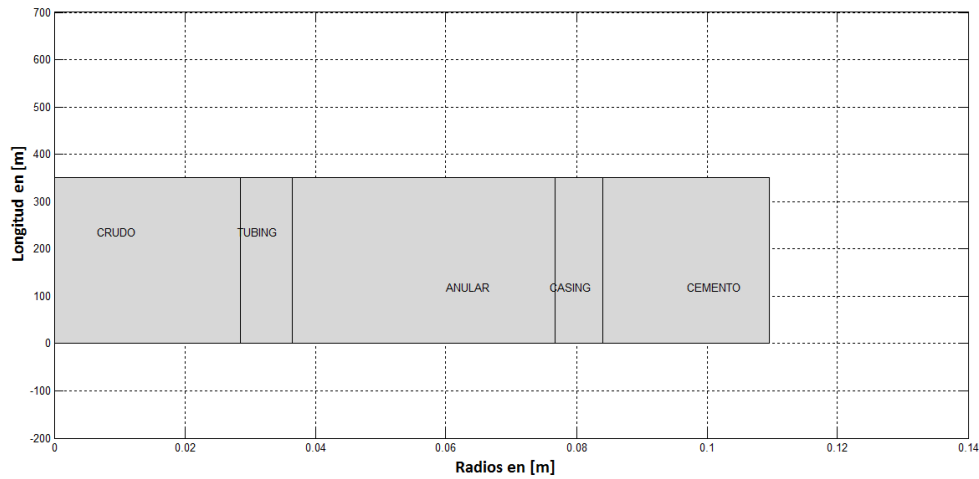
En primera instancia, haciendo uso de la función “Draw” se delimitaron las áreas a manera de cortes de perfil de cada uno de los componentes estructurales de todo el pozo tomando como distancias de separación los respectivos radios asociados en metros. Para ahorrar cálculo computacional se obviaron los diámetros completos por la presente simetría cilíndrica y se tuvo presente una sección de la longitud total por limitaciones del software.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



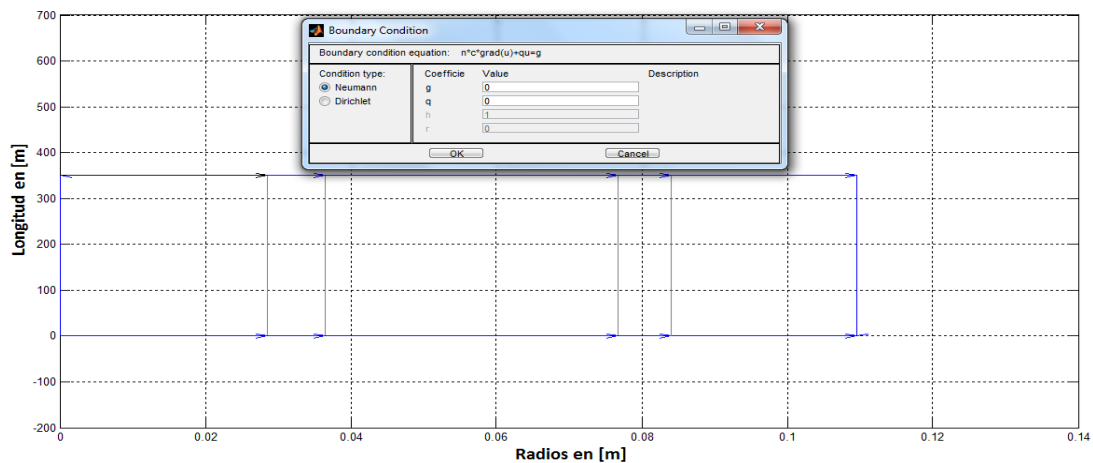
Universidad
Industrial de
Santander

Figura 20: Delimitación gráfica de las áreas de simulación



Luego, con la función “Boundary” se definieron las condiciones de fronteras de Neumann externas como nulas implicando que no existen en dichos límites presencia de flujos de calor y por lo tanto corresponde a un sistema térmico aislado:

Figura 21. Ajuste de las condiciones de frontera para las áreas de simulación



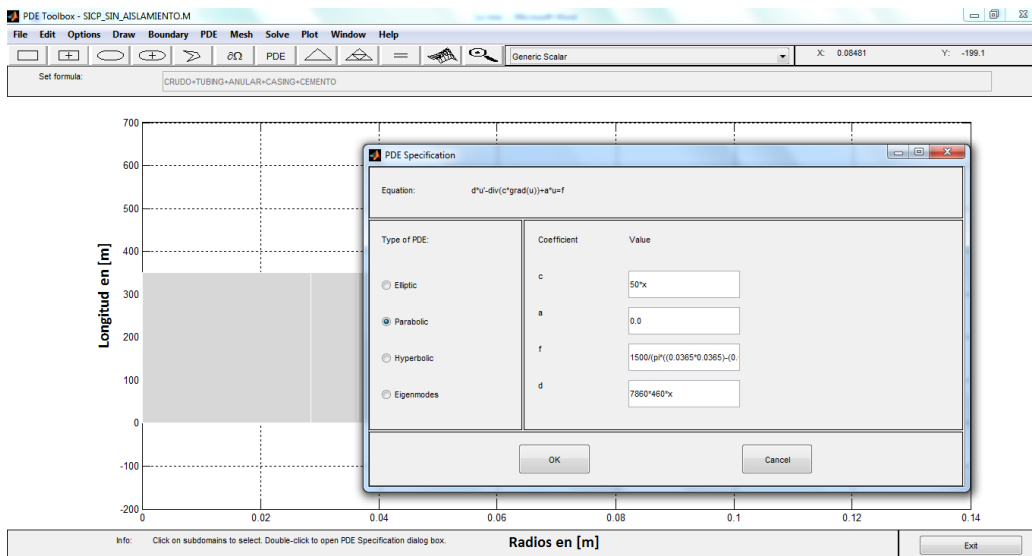
MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Previo a la simulación, con la función “PDE” se declara para cada medio físico los parámetros de la ecuación parabólica, expresada en coordenadas cilíndricas, que corresponde a la solución de la ecuación de calor donde los coeficientes lineales c , f y d representan en su orden la conductividad térmica del material, la potencia generada ²⁸ en caso de tratarse de un elemento térmico, y el producto del calor específico y la densidad propias del material:

Figura 22. Especificación de los parámetros de las ecuaciones diferenciales del flujo de calor



Mientras que en la función “Solve” se especifica el tiempo de simulación a una condición inicial de temperatura promedio. Para este caso se ajusta a dos horas (7200 segundos) a una temperatura de 30,2°C, la cual surge como resultado de

²⁸ Estas potencias corresponden a las halladas mediante simulación numérica para el punto de cristalización y de fusión de las parafinas (Tabla 9)

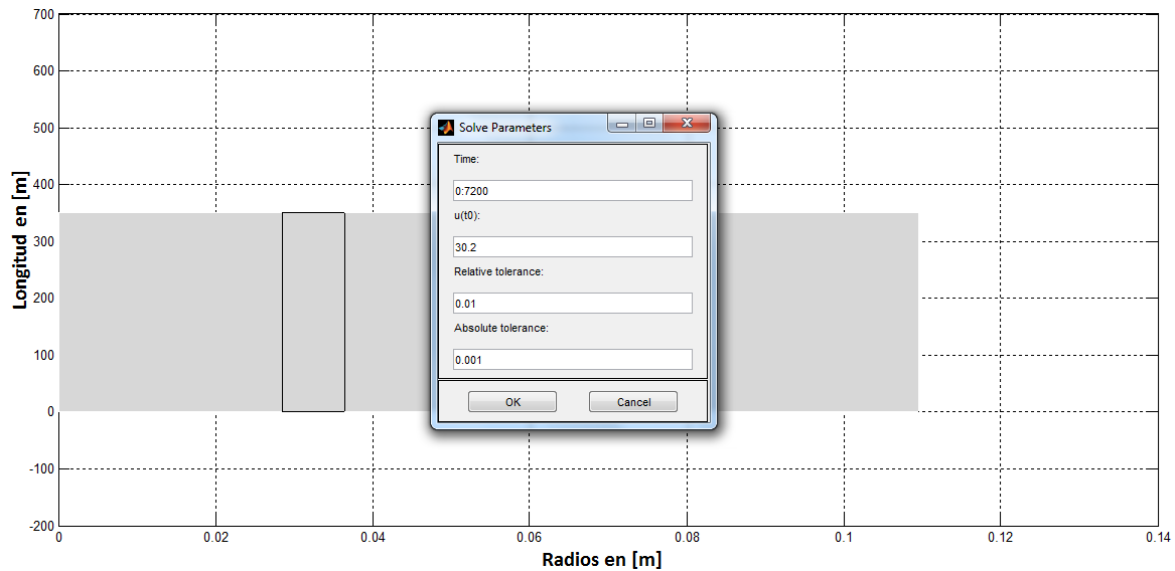
MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

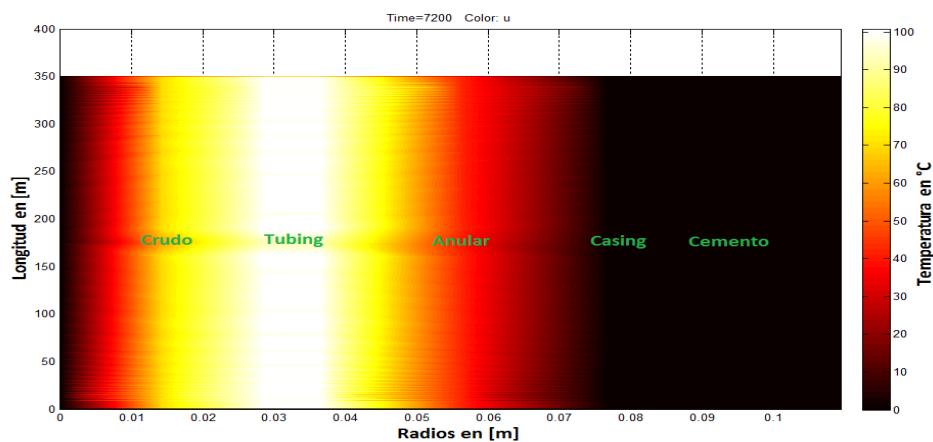
promediar las temperaturas convertidas a grados Celsius para el crudo del pozo Col-25 (Tercera columna, Tabla 9):

Figura 23. Ajuste del tiempo de simulación y de la temperatura inicial



Obteniéndose finalmente la simulación teniendo presente los anteriores pasos declarados:

Figura 24. Simulación gráfica del gradiente térmico resultante



MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

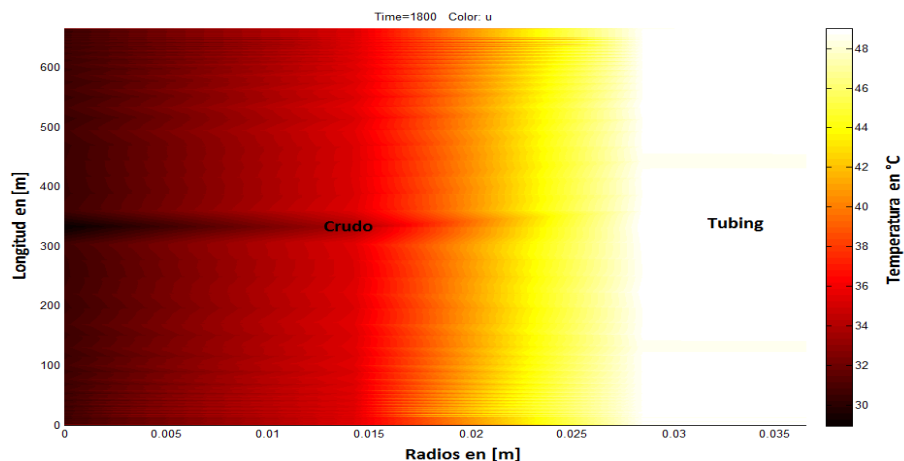


Universidad
Industrial de
Santander

En la figura se corrobora gráficamente la explicación que se realizó en la sección anterior acerca del comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor global, así como los resultantes por convección y por radiación en el anular, sustentándose en que el gradiente térmico producto del elemento generador de calor (“tubing”), aún sin encontrarse adherido un revestimiento de aislamiento, solo adquiere especial relevancia directamente sobre el crudo y se reduce su influencia en las porciones cercanas a los extremos del pozo. Por consiguiente, se puede despreciar el aporte térmico de los demás sectores y enfocarse específicamente en las simulaciones de la interacción existente entre el crudo y el “tubing”, con o sin aislamiento, tal cual se exhiben en las siguientes gráficas:

3.3.1 Resultados de la simulación gráfica para el punto de cristalización de las parafinas En la figura actual se deja entrever que al cabo de media hora (1800 segundos) de simulación se alcanzan temperaturas próximas al punto de cristalización (32°C) de las parafinas al aplicarse una potencia de 2[kW] al “tubing”, dicha medida de tiempo representa entonces un estimado de la duración del estado transitorio para el calentamiento por Efecto Joule sin aislamiento bajo dichas condiciones.

Figura 25. Gradiente térmico para el punto de cristalización (Sin aislamiento)



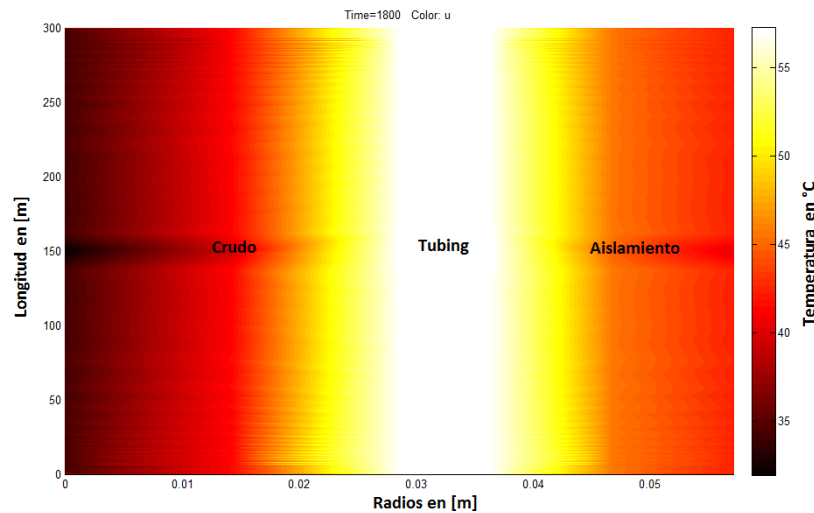
MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

No obstante, al adjuntar un revestimiento de aislamiento al “tubing” para la misma situación, se observa que se puede conseguir en comparación un mayor gradiente térmico con una potencia menor de 1,3[kW] tal como se ilustra en la figura 26, reduciendo así los costos de operación.

Figura 26. Gradiente térmico para el punto de cristalización (Con aislamiento)



3.3.2 Resultados de la simulación gráfica para el punto de fusión de las parafinas Al igual que en el caso anterior, en las figuras 27 y 28 también se detallan las mismas ventajas en términos de incremento de gradiente térmico y disminución de la potencia demandada por la tubería de producción para alcanzar por calentamiento la temperatura de fusión de las parafinas, discerniendo en un antes y después del acople del aislamiento.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad Industrial de Santander

Figura 27. Gradiente térmico para el punto de fusión (Sin aislamiento)

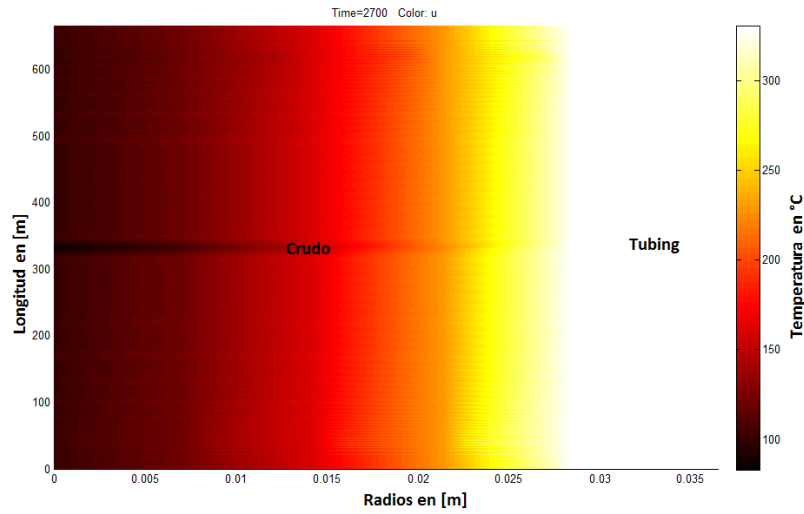
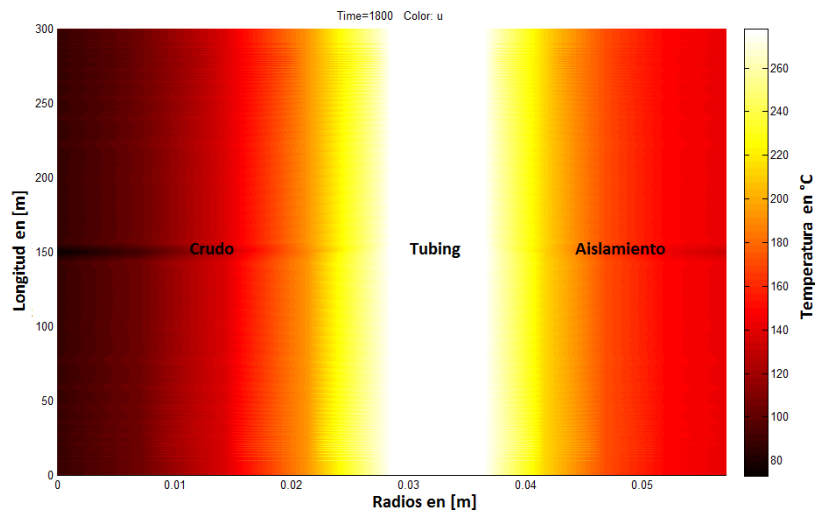


Figura 28. Gradiente térmico para el punto de fusión (Con aislamiento)



Los tiempos de transición estimados fueron de cuarenta y cinco minutos (2700 segundos) y media hora (1800 segundos) asociados con potencias suministradas de 20[kW] y 12[kW] respectivamente.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

En resumidas cuentas, los resultados de la simulación gráfica del modelo térmico en la presente sección revelan las ventajas con relación al aprovechamiento térmico del calor generado por la tubería de producción al realizar la instalación del aislamiento, además de reducir valores de los tiempos de transición de calentamiento y de potencias totales consumidas. Sin embargo, cabe recordar que esta simulación se halla sujeta a asunciones para facilitar su desarrollo una vez alcanzado el estado estable, por ello se propone diseñar un sistema de control que garantice una temperatura mínima específica con el propósito de no incurrir a un desgaste térmico progresivo y en un consumo energético más allá de lo prescindible.

3.4 Análisis comparativo del sistema de calentamiento del tubo de conducción de crudo por efecto joule frente al sicp

Los modelos eléctrico y de transferencia de calor planteados anteriormente para el sistema de calentamiento del tubo de conducción de crudo por Efecto Joule se desarrollan para un circuito tubing-cable de retorno. La transferencia de calor al crudo se da a partir de las pérdidas eléctricas originadas en el tubing de acero (efecto Joule) cuando por este circula una corriente eléctrica (que regresa por el conductor de retorno cerrando el circuito) y por el fenómeno de convección natural se transmite el calor en el crudo. El conductor de retorno es de cobre y aislamiento XLPE. Para caracterizar este sistema, se utiliza el modelo pi de una línea de transmisión[3] compuesta por el sistema tubing-cable, cuyos parámetros eléctricos fueron formulados. En el SICP se hace circular una corriente eléctrica por el tubing y esta retorna a través del casing de la tubería de producción. Este sistema se modela como un conductor coaxial ya que es la configuración que más se le asemeja eléctricamente.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Al replantear el modelado del SICP se observan ventajas en el sistema de calentamiento del tubo de conducción de crudo orientadas a minimizar el gasto energético y mejoramiento del proceso de extracción de crudo.

Tabla 13. Cuadro comparativo del sistema de calentamiento del tubo de conducción de crudo por efecto joule frente al SICP

| CUADRO COMPARATIVO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO POR EFECTO JOULE FRENTE AL SICP | |
|---|--|
| SICP[6] | CALENTAMIENTO TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO |
| <p>Mayor consumo energético por alta impedancia eléctrica:</p> <p>La corriente eléctrica circula por el tubing y retorna por el casing. Debido al estado corrosivo de la tubería de producción que aumenta su resistividad, se consume gran cantidad de corriente en la misma. El casing tiene un mayor tamaño que el tubing y no tiene contacto directo con el crudo por lo que genera pérdidas energéticas que no aportan a la transferencia de calor al crudo.</p> | <p>Menor consumo energético por disminución de impedancia eléctrica empleando el conductor de retorno:</p> <p>La corriente eléctrica circula por el tubing y regresa por el conductor de retorno elaborado con cobre y seleccionado con un aislamiento que soporta las condiciones de temperatura de trabajo. La función del conductor de retorno es disminuir la impedancia eléctrica del sistema. Puesto que está compuesto de cobre, las pérdidas se concentrarán en el tubing compuesto de acero. Este acero presenta una alta impedancia debido a la corrosión que presenta la tubería.</p> |

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Tabla 13. (Continuación)

| | |
|---|--|
| <p>Modelo eléctrico y térmico:</p> <p>La caracterización eléctrica del SICP se realiza modelando la tubería de producción como un cable coaxial debido a la configuración física de la misma. El modelo de transferencia de calor contempla de forma superficial un balance de energía dado a partir de una ecuación diferencial parcial que abarca el sistema tubería-crudo.</p> | <p>Modelo eléctrico y térmico:</p> <p>La caracterización eléctrica se realiza a través del modelo pi[3] de una línea de transmisión considerando al tubing como un cilindro hueco y calculando sus parámetros eléctricos junto con el conductor de retorno y analizando los distintos efectos resistivos, inductivos y capacitivos presentes. El modelo de transferencia de calor se realiza de forma completa para un pozo petrolero contemplando el sistema crudo, tubing, anular, casing, cemento revestidor, formación, etc., que conllevan a un cálculo más exacto de la potencia eléctrica requerida para realizar el calentamiento del crudo.</p> |
| <p>Confinamiento del calor en el crudo:</p> <p>El calentamiento se realiza al transferir el calor desde el tubing por Efecto Joule al crudo cuando circula una corriente eléctrica por este. Existen pérdidas térmicas hacia el anular, además de las originadas en el casing que incrementan el consumo energético.</p> | <p>Confinamiento del calor en el crudo debida al aislamiento térmico-eléctrico:</p> <p>Se propone y analiza el uso de un aislamiento térmico (que cumple funciones de aislamiento eléctrico) que confine la mayoría del calor en el crudo y evite fugaz del mismo hacia el anular y demás alrededores del pozo, logrando un calentamiento en menor tiempo con una disminución de la cantidad de energía utilizada para el mismo.</p> |
| <p>Disolución de parafinas y costos energéticos:</p> <p>Como consecuencia de lo anterior, la disolución de los cúmulos de parafinas se realizará en un tiempo mayor y con un mayor consumo de corriente eléctrica.</p> | <p>Disolución de parafinas y costos energéticos:</p> <p>Debido al cálculo más preciso de la potencia requerida para alcanzar la temperatura de fusión y de nube, y a la disminución de la impedancia eléctrica del sistema, la disolución de parafinas se realiza en un tiempo menor.</p> |



4. COSTOS ENERGÉTICOS.

En el presente capítulo, se realiza un análisis económico que contiene el cálculo de los costos energéticos que conlleva aplicar la potencia eléctrica requerida en la tubería de producción (“tubing”) para alcanzar la temperatura deseada en el crudo y lograr la disolución de los cúmulos de parafinas o la formación de los mismos al implementar el sistema de calentamiento del tubo de conducción de crudo por Efecto Joule. Se realizan dos tipos de cálculos de acuerdo con las simulaciones realizadas en el capítulo anterior. En el primer cálculo se considera el “tubing” rodeado por el aislamiento térmico-eléctrico. En el segundo cálculo se considera el “tubing” sin el aislamiento. Para cada caso se calcula el costo en pesos colombianos de la energía eléctrica resultado de aplicar la potencia eléctrica en un determinado tiempo para lograr en el crudo la temperatura de fusión y posteriormente la temperatura de cristalización. Para esto, se tienen en cuenta los valores del costo de energía eléctrica para producir un barril de crudo (USD/Barril)²⁹ y el costo en pesos del kWh³⁰ en el Campo Escuela Colorado.

Al realizar el análisis, se hacen las siguientes consideraciones:

- El costo en pesos de la energía eléctrica se halla con valores proporcionados por el Campo Escuela Colorado. Algunos valores son aproximaciones válidas para dar un estimado del costo real.
- El costo en pesos de la energía eléctrica se calcula con un tiempo aproximado arrojado por la simulación. Este tiempo es el que tarda el crudo en alcanzar la temperatura deseada, Sin embargo, no es el tiempo

²⁹ Cotización del petróleo en dólares por barril.

³⁰ Se usa generalmente para la facturación del consumo eléctrico.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

real que tardan las parafinas en descomponerse ya que esto depende del estado actual del pozo.

- Una vez alcanzada la temperatura de cristalización, el sistema de calentamiento del tubo de producción de crudo por Efecto Joule debe mantenerse activo para evitar la posible formación de parafinas.

4.1 Costos de extracción y costos energéticos del Campo Escuela Colorado

En la tabla 14 se presentan los costos de extracción, costos de energía eléctrica para producir un barril de crudo y el costo del kWh del Campo Escuela Colorado. Estos datos fueron proporcionados por el Campo Escuela Colorado³¹[36].

En el sector eléctrico, el costo de la energía eléctrica se da en \$/kWh. A partir de los valores de potencia eléctrica y tiempo³² se puede obtener la energía como lo muestra la ecuación (1.27):

$$P = E / t \quad (1.27)$$

P: Potencia Eléctrica.

E: Energía Eléctrica en kWh.

t: Tiempo.

Despejando, se obtiene la fórmula para la energía eléctrica como se muestra a continuación:

³¹ Precios referidos al año 2013.

³² Tiempo en el que se alcanza la temperatura deseada en el crudo.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

$$E = P * t \quad [\text{kWh}] \quad (1.28)$$



Universidad Industrial de Santander

Tabla 14. Costos Campo Escuela Colorado.

| Costos Campo Escuela Colorado | | |
|---|-----------------|--------------------------|
| Costo de extracción después de perforar el pozo | 22,5 USD/Barril | 46106,56 \$/Barril |
| Costo de energía eléctrica para producir un barril de crudo | 1,27 USD/Barril | 2602,46 \$/Barril |
| Costo kilowatt-hora (\$/kWh) | | 380 \$/kWh ³³ |

Fuente: [36]

De las simulaciones realizadas en el capítulo anterior, se tienen las potencias y tiempos aproximados necesarios para alcanzar la temperatura de fusión y de cristalización para el “tubing” con aislamiento y sin aislamiento. Las temperaturas de fusión y cristalización para el Campo Escuela Colorado se presentan en la tabla 15:

³³ Costo del 2013.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Tabla 15. Temperaturas de fusión y de cristalización del Campo Escuela Colorado.

| | | |
|-------------------------------|-------|--------|
| Temperatura de Fusión | 234°F | 112 °C |
| Temperatura de cristalización | 90°F | 30 °C |

4.2 Cálculo del costo de la energía eléctrica considerando el “tubing” con aislamiento

Al considerar el “tubing” rodeado del aislamiento, se obtienen dos potencias eléctricas para las temperaturas de fusión y cristalización logradas a partir de las simulaciones realizadas. Estas se presentan en la tabla 16:

Tabla 16. Potencias eléctricas para el “tubing” con aislamiento.

| “Tubing” con aislamiento | | |
|---------------------------------|--------------------------------|--|
| | A Temperatura de fusión | A Temperatura de cristalización |
| Potencia | 11,724 kW | 1,3027 kW |

De acuerdo a los resultados de las simulaciones, el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de fusión en el crudo es de aproximadamente 30 minutos equivalentes a media hora (0.5 [h]). Reemplazando estos valores de tiempo y potencia en la ecuación (1.29), se obtiene:

$$E = P * t = 11,724 \text{ [kW]} * 0,5 \text{ [h]} = 5,862 \text{ [kWh]} \quad (1.29)$$

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

El resultado anterior muestra el valor de energía eléctrica necesaria para alcanzar el punto de fusión en el crudo y empezar el proceso de descomposición de los cúmulos de parafina.

Teniendo en cuenta el costo del kWh[36] ya mencionado para el Campo Escuela Colorado, el costo de aplicar esta potencia de fusión durante media hora es de:

$$5,862 \text{ [kWh]} * 380 \text{ [$/kWh]} = \$2227,56$$

Una vez que se ha conseguido descomponer los cúmulos de parafina en su mayoría, se procede a disminuir la potencia eléctrica para alcanzar la temperatura de cristalización. Teniendo en cuenta el costo del kWh ya mencionado para el Campo Escuela Colorado, el costo de aplicar esta potencia de cristalización durante media hora (tiempo estimado en la simulación) es de:

$$E = P * t = 1,3027 \text{ [kW]} * 0,5 \text{ [h]} = 0,651 \text{ [kWh]} \quad (1.30)$$

$$0,651 \text{ [kWh]} * 380 \text{ [$/kWh]} = \$247,38$$

4.3 Cálculo del costo de la energía eléctrica considerando el “tubing” sin aislamiento

Al considerar el “tubing” sin el aislamiento, se obtienen dos potencias eléctricas para las temperaturas de fusión y cristalización logradas a partir de las simulaciones realizadas. Estas se presentan en la tabla 17:

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Tabla 17. Potencias eléctricas para el “tubing” sin aislamiento.

| “Tubing” sin aislamiento | | |
|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| | A Temperatura de fusión | A Temperatura de cristalización |
| Potencia | 17,955 kW | 1,995 kW |

De los datos de potencia eléctrica obtenidos, se observa que el aislamiento cumple su función térmica al disminuir la potencia requerida si éste se encuentra rodeando al “tubing”. El uso del aislamiento se vuelve importante ya que representa un ahorro energético.

De acuerdo a los resultados de las simulaciones, el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de fusión en el crudo estando el “tubing” sin aislamiento es de aproximadamente 45 minutos equivalentes a $\frac{3}{4}$ de hora (0.75 [h]). Reemplazando estos valores de tiempo y potencia en la ecuación (1.30), se obtiene:

$$E = P * t = 17,955 \text{ [kW]} * 0,75 \text{ [h]} = 13,47 \text{ [kWh]} \quad (1.31)$$

El resultado anterior muestra la energía eléctrica necesaria para alcanzar el punto de fusión en el crudo y empezar el proceso de descomposición de los cúmulos de parafina.

Teniendo en cuenta el costo del kWh[36] ya mencionado para el Campo Escuela Colorado, el costo de aplicar esta potencia de fusión durante 45 minutos es de:

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

$$13,47 \text{ [kWh]} * 380 \text{ [$/kWh]} = \$5118,6$$

Una vez que se ha conseguido descomponer los cúmulos de parafina en su mayoría, se procede a disminuir la potencia eléctrica para alcanzar la temperatura de cristalización en un tiempo de media hora (según la simulación). El costo para alcanzar la temperatura de cristalización es:

$$E = P * t = 1,995 \text{ [kW]} * 0,5 \text{ [h]} = 0,9975 \text{ [kWh]} \quad (1.32)$$

$$0,9975 \text{ [kWh]} * 380 \text{ [$/kWh]} = \$379,1$$

4.4 Resumen de costos

En las siguientes tablas se resumen los costos de la energía para los dos casos planteados, es decir, el “tubing” con aislamiento y sin aislamiento:

Tabla 18. Precio de la energía para el “tubing” con aislamiento.

| “Tubing” con aislamiento | | |
|---------------------------------|--------------------------------|--|
| | A Temperatura de fusión | A Temperatura de cristalización |
| Precio de energía (\$) | \$2227,56 | \$247,38 |

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Tabla 19. Precio de la energía para el “tubing” sin aislamiento.

| “Tubing” sin aislamiento | | |
|---------------------------------|--------------------------------|--|
| | A Temperatura de fusión | A Temperatura de cristalización |
| Precio de energía (\$) | \$5118,6 | \$379,1 |

Los costos calculados se estiman para la potencia eléctrica a la cual se alcanza la temperatura deseada. No es posible conocer el estado del pozo COL 25 en cuanto a la cantidad de parafina formada en el mismo. Se propone el uso de sensores[6] para monitorear el estado del pozo y determinar el tiempo agregado requerido para descomponer los cúmulos de parafinas en su totalidad e igualmente conocer la periodicidad con que se aplicará el sistema de calentamiento para alcanzar la temperatura de cristalización.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



De la investigación y el trabajo realizado se concluye:

El objetivo general del presente trabajo de investigación se ha alcanzado a cabalidad debido a que se desarrolló una herramienta de software teniendo presentes parámetros asociados a un pozo en particular del Campo Escuela Colorado, para así analizar numérica y gráficamente la influencia del calentamiento del tubo de conducción de dicho pozo por Efecto Joule en el comportamiento que expresaría el gradiente de temperatura que tiene lugar entre su crudo y los elementos estructurales que circundan a éste en el yacimiento, modelando para ello la transferencia de calor radial implícita como resistencias térmicas y al “tubing” como un elemento térmico como tal. Esta aplicación busca asegurar las temperaturas de cristalización y de fusión de las parafinas en la longitud total del “tubing” determinando las potencias demandadas requeridas y los tiempos de calentamiento asociados, al igual que demostrar la ventaja de adjuntar un aislamiento termo-electrico.

Se mejoró la técnica del Sistema de inyección de corriente para calentamiento resistivo de la tubería de producción presentado en una investigación anterior del Campo Escuela Colorado replanteando el circuito por el cual fluye la corriente eléctrica para concentrar las pérdidas de calor principalmente en el “tubing” y no en partes estructurales que no tienen contacto directo con el crudo como ocurría anteriormente. Esto, a través de la disminución de la frecuencia de trabajo, del cable de retorno con baja impedancia y del aislamiento térmico que se propone

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

para cubrir al “tubing” y evitar la fuga de calor. Todo esto obtenido a partir del planteamiento de nuevos modelos eléctricos y de transferencia de calor de la tubería de producción que contienen un análisis más detallado de las propiedades y del comportamiento de la interfase tubería-crudo.

Se realizó un barrido por muestreo y caracterización de parafinas de los diversos pozos de producción del Campo Escuela Colorado, referenciados formalmente en proyectos de grado de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, al igual que en la información técnica suministrada gracias al convenio académico al cual se encuentra adscrito la presente tesis con dicha entidad, se compararon los pozos que actualmente presentan actividad o que son viables de tenerla a futuro tomando en cuenta la condición estructural, facilidad de acceso, producción y estado actual. Se determinó entonces que el pozo COL-25 se adecuaba como caso de estudio para el modelamiento de la transferencia de calor de su crudo, por ende la simulación del calentamiento por Efecto Joule es orientada de acorde a los aspectos más significativos de dicho pozo.

Se simuló el modelo de transferencia de calor de un pozo de producción del Campo Escuela Colorado teniendo presente las especificaciones técnicas y las propiedades térmicas tanto del crudo como de los demás materiales que conforman las estructuras restantes del yacimiento, asumiendo para ello condiciones de operación en estado estable y desarrollando análisis numérico y gráfico asistido por un entorno de programación, con el objetivo de estudiar el gradiente de temperatura resultante sobre el crudo al aplicar calentamiento en el “tubing” por Efecto Joule hasta alcanzar las temperaturas de cristalización y de fusión de las parafinas que contiene. Los resultados obtenidos de estas

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

simulaciones son concluyentes y satisfactorios por si mismos en tanto corresponden al propósito general de la tesis. Adicionalmente, estos ponen en evidencia la importancia de acoplar un aislante termo-eléctrico al “tubing” puesto que se reducen los tiempos y potencias eléctricas destinadas al calentamiento resistivo del “tubing” a la vez que se incrementa el gradiente de temperatura por confinamiento de calor en el mismo.

Se analizó la viabilidad térmico-económica del sistema de calentamiento del tubo de conducción de crudo por Efecto Joule. En lo referente al aspecto económico, por medio de datos proporcionados por el Campo Escuela Colorado se calcularon los costos energéticos implicados en el calentamiento del crudo a las temperaturas de fusión y cristalización de las parafinas, obteniéndose costos bajos cuando se utiliza aislamiento termico acoplado al “tubing”. Además, se desarrolló el sistema de calentamiento con la misma infraestructura del pozo petrolero sin que esto implique recurrir a modificaciones en el mismo, utilizando el “tubing” y un conductor electrosumergible que corresponde al mismo cable utilizado para alimentar la bomba de extracción del pozo, garantizándose así la viabilidad técnica de este sistema.

Se recomienda:

Incentivar estudios a futuro que conlleven a la aplicación práctica del calentamiento resistivo por Efecto Joule en los pozos de producción del Campo Escuela Colorado con el objetivo de incrementar su producción.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Proponer el diseño de un sistema de control que gestione los tiempos de apagado y encendido del calentamiento resistivo por Efecto Joule, haciendo uso de sensores térmicos ajustados para garantizar una determinada temperatura mínima una vez alcanzado el estado estacionario, con la finalidad de evitar un desgaste estructural térmico progresivo y para ahorrar en costos de operación.

Plantear una propuesta de proyecto que comprenda la caracterización y simulación de la transferencia de calor resultante en pozos de producción ante el calentamiento resistivo por Efecto Joule bajo condiciones de operación reales, en aras de proporcionar un análisis más detallado con respecto a la viabilidad técnica y económica de dicha técnica.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] E. Ariza León, “DETERMINACION DEL UMBRAL DE CRISTALIZACION DE LAS PARAFINAS EN EL CRUDO DEL CAMPO COLORADO” Universidad Industrial de Santander, Escuela de petróleos, 2008.
- [2] B. C. W. Mcgee, F. E. Vermeulen, and M. leee, “Power Losses in Steel Pipe Delivering Very Large Currents,” vol. XX, pp. 1–11.
- [3] J. J. Grainger and W. D. S. Jr., *Análisis de Sistemas de Potencia*. 2001.
- [4] R. B. Lastra, “Modelos de Líneas de Transmisión en Estado Estacionario.” [Online]. Available:
<http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/transel/Apuntes/Cuadripolos.pdf>.
- [5] “Inductancia Interna de Conductores.” [Online]. Available:
<http://www.ing.unlp.edu.ar/camposyo/Inductancia Interna.pdf>.
- [6] O. Leonardo and P. Galvis, “SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE,” Universidad Industrial de Santander, maestría en ingenierías Área Electrónica, Escuela de Ing. Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2008.
- [7] “CATÁLOGO CABLES FLEXIBLES.” [Online]. Available:
http://www.condumex.com.mx/ES/control_y_flexibles/Paginas/catalogo_cables_flexibles.aspx?id_producto=164.
- [8] P. P. Mendoza and J. R. Yerena, “TRANSFERENCIA DE CALOR EN TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN / INYECCIÓN EN UN POZO”, Caracas , Noviembre 2005,” Universidad Central de Venezuela, 2005.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

- [9] “Efecto Joule Thomsom.” [Online]. Available:
http://www.unizar.es/departamentos/fisica_mat_condensada/people/juanjo/tecnicasl/P4.pdf.
- [10] A. R. Hasan and C. S. Kabir, *Fluid Flow and Heat Transfer in Wellbores*. 2002.
- [11] “Ley de Conducción de Fourier.” [Online]. Available:
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/transporte/cond_calor/conduccion/conduccion.html.
- [12] “Funciones de Bessel.” [Online]. Available:
http://es.wikipedia.org/wiki/Función_de_Bessel.
- [13] FIBER GLASS COLOMBIA S.A., “Aislamiento Térmico para Tuberías.”
- [14] F. Castellanos, Henry y GRAJALES, “Modelo analítico del calentamiento electromagnético aplicado a la formación en yacimientos de crudo pesado trabajo de grado (ingeniero de petróleos),” Universidad Industrial de Santander, 2004.
- [15] B. Vermeulen, Fred and McGee, *In Situ Electromagnetic Heating for Hydrocarbon Recovery and Enviromental Remediation*, Volume 39,. 2000.
- [16] R. Sierra, “Promising progress in field application of reservoir electrical heating methods,” Society Engineer of Petroleum.
- [17] R. B. Sahni, A., Kumar, M. y K.Napp, “Electromagnetic Heating for Heavy Oil Reservoirs,” *Soc. Eng. Pet.*, vol. SPE 62550, 2000.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

- [18] M. C. Alba, "Preestudio para el desarrollo de un equipo de calentamiento por inducción." [Online]. Available:
[http://www.uam.es/personal_pas/mcuenca/mifiles/Desarrollo de un equipo de calentamiento por induccion.pdf](http://www.uam.es/personal_pas/mcuenca/mifiles/Desarrollo%20de%20un%20equipo%20de%20calentamiento%20por%20induccin.pdf).
- [19] "Electric heater for oil wells and the like." [Online]. Available:
<http://www.google.com.br/patents/US1464618>.
- [20] R. S. Pershing, "Electric Heater for oil wells and the like.," Patente 1464618.
- [21] "ANALISIS DE POSIBLES ESCENARIOS PARA LA INYECCION CONTINUA DE VAPOR EN EL CAMPO TECA."
- [22] R. J. Stegemeier, "Liquid Filled Well eater," Patente 2932352.
- [23] "Electric oil well heater apparatus." [Online]. Available:
<http://www.google.com.br/patents/US3114417>.
- [24] P. B. McCarthy, "Electric Oil Well heating Apparatus," Patente 3114417.
- [25] G. Bridges, J. Dubiel, "Power Sources for downhole electrical heating," Patente 5099181991.
- [26] L. Technologies, "Company Overview: Lynbrook Technologies." [Online]. Available:
http://www.rigzone.com/search/sites/Lynbrook_Technologies5860.asp.
- [27] T. T. Controls, "Skin-effect heating systems." [Online]. Available:
<http://www.pentairthermal.com/products/engineered-products/skin-effect-heating-systems/>.
- [28] U. I. de S. Campo Escuela Colorado, "COLORADO_ 25: WELL COMPLETION DIAGRAM." 2010.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



- [29] Miliarium, “Propiedades térmicas de materiales.” [Online]. Available: <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>.
- [30] Arkiplus, “Concreto normal.” [Online]. Available: <http://www.arkiplus.com/el-concreto-normal>.
- [31] Vaxa Software, “Tabla de calor específico.” [Online]. Available: http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/fis/calorespec.pdf.
- [32] efunda, “Properties of Aire.” [Online]. Available: http://www.efunda.com/materials/common_matl/show_gas.cfm?MatlName=Air0C.
- [33] I. S. de C. Geológica, “Propiedades térmicas de las rocas.” [Online]. Available: http://insugeo.org.ar/libros/cg_15/capitulo_1.htm.
- [34] Nasa, “Earth: Facts & Figures.” [Online]. Available: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Earth&Display=Facts&System=Metric>.
- [35] J. PÉREZ, M. CABARCAS, L. VELILLA, I. URIBE, and C. VASQUEZ, “DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD EN POZOS CON CALENTAMIENTO ELÉCTRICO,” Universidad Industrial de Santander.
- [36] J. E. Ardila Álvarez and E. L. Rodríguez Orozco, “DISEÑO DE UN PROGRAMA PARA EL USO RACIONAL Y EFICIENTE DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE CRUDO DEL CAMPO ESCUELA COLORADO,” Universidad Industrial de Santander, 2008.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

- [37] “Resistencia de un Tubo.” [Online]. Available:
http://laplace.us.es/wiki/index.php/Resistencia_de_un_tubo.



Universidad
Industrial de
Santander

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

BIBLIOGRAFÍA.

A. R. Hasan and C. S. Kabir, *Fluid Flow and Heat Transfer in Wellbores*. 2002.

“ANÁLISIS DE POSIBLES ESCENARIOS PARA LA INYECCIÓN CONTINUA DE VAPOR EN EL CAMPO TECA.”

Arkiplus, “Concreto normal.” [Online]. Available: <http://www.arkiplus.com/el-concreto-normal>.

B. C. W. McGee, F. E. Vermeulen, and M. Lee, “Power Losses in Steel Pipe Delivering Very Large Currents,” vol. XX, pp. 1–11.

B. Vermeulen, Fred and McGee, *In Situ Electromagnetic Heating for Hydrocarbon Recovery and Environmental Remediation*, Volume 39, 2000.

“CATÁLOGO CABLES FLEXIBLES.” [Online]. Available: http://www.condumex.com.mx/ES/control_y_flexibles/Paginas/catalogo_cables_flexibles.aspx?id_producto=164.

E. Ariza León, “DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE CRISTALIZACIÓN DE LAS PARAFINAS EN EL CRUDO DEL CAMPO COLORADO” Universidad Industrial de Santander, Escuela de petróleos, 2008.

“Efecto Joule Thomsom.” [Online]. Available: http://www.unizar.es/departamentos/fisica_mat_condensada/people/juanjo/tecnicasl/P4.pdf.

efunda, “Properties of Aire.” [Online]. Available: http://www.efunda.com/materials/common_matl/show_gas.cfm?MatlName=Air0C.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

“Electric heater for oil wells and the like.” [Online]. Available: <http://www.google.com.br/patents/US1464618>.

“Electric oil well heater apparatus.” [Online]. Available: <http://www.google.com.br/patents/US3114417>.

F. Castellanos, Henry y GRAJALES, “Modelo analítico del calentamiento electromagnético aplicado a la formación en yacimientos de crudo pesado trabajo de grado (ingeniero de petróleos),” Universidad Industrial de Santander, 2004.

FIBER GLASS COLOMBIA S.A., “Aislamiento Térmico para Tuberías.”

“Funciones de Bessel.” [Online]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Función_de_Bessel.

G. Bridges, J. Dubiel, “Power Sources for downhole electrical heating,” Patente 5099181991.

“Inductancia Interna de Conductores.” [Online]. Available: [http://www.ing.unlp.edu.ar/camposyo/Inductancia Interna.pdf](http://www.ing.unlp.edu.ar/camposyo/Inductancia%20Interna.pdf).

I. S. de C. Geológica, “Propiedades térmicas de las rocas.” [Online]. Available: http://insugeo.org.ar/libros/cg_15/capitulo_1.htm.

J. J. Grainger and W. D. S. Jr., *Análisis de Sistemas de Potencia*. 2001.

J. E. Ardila Álvarez and E. L. Rodríguez Orozco, “DISEÑO DE UN PROGRAMA PARA EL USO RACIONAL Y EFICIENTE DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE CRUDO DEL CAMPO ESCUELA COLORADO,” Universidad Industrial de Santander, 2008.

J. PÉREZ, M. CABARCAS, L. VELILLA, I. URIBE, and C. VASQUEZ, “DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD EN POZOS CON CALENTAMIENTO ELÉCTRICO,” Universidad Industrial de Santander.

“Ley de Conducción de Fourier.” [Online]. Available: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/transporte/cond_calor/conduccion/conduccion.html.

L. Technologies, “Company Overview: Lynbrook Technologies.” [Online]. Available: http://www.rigzone.com/search/sites/Lynbrook_Technologies5860.asp.

M. C. Alba, “Preestudio para el desarrollo de un equipo de calentamiento por inducción.” [Online]. Available: [http://www.uam.es/personal_pas/mcuenca/mifiles/Desarrollo de un equipo de calentamiento por induccion.pdf](http://www.uam.es/personal_pas/mcuenca/mifiles/Desarrollo_de_un_equipo_de_calentamiento_por_induccion.pdf).

Miliarium, “Propiedades térmicas de materiales.” [Online]. Available: <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>.

Nasa, “Earth: Facts & Figures.” [Online]. Available: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Earth&Display=Facts&System=Metric>.

O. Leonardo and P. Galvis, “SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE,” Universidad Industrial de Santander, maestría en ingenierías Área Electrónica, Escuela de Ing. Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2008.

P. B. McCarthy, “Electric Oil Well heating Apparatus,” Patente 3114417.

P. P. Mendoza and J. R. Yerena, “TRANSFERENCIA DE CALOR EN TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN / INYECCIÓN EN UN POZO”, Caracas , Noviembre 2005,” Universidad Central de Venezuela, 2005.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

R. B. Lastra, “Modelos de Líneas de Transmisión en Estado Estacionario.” [Online]. Available:

<http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/transel/Apuntes/Cuadripolos.pdf>.

R. B. Sahni, A., Kumar, M. y K.Napp, “Electromagnetic Heating for Heavy Oil Reservoirs,” *Soc. Eng. Pet.*, vol. SPE 62550, 2000.

“Resistencia de un Tubo.” [Online]. Available:
http://laplace.us.es/wiki/index.php/Resistencia_de_un_tubo.

R. J. Stegemeier, “Liquid Filled Well eater,” Patente 2932352.

R. S. Pershing, “Electric Heater for oil wells and the like.,” Patente 1464618.

R. Sierra, “Promising progress in field application of reservoir electrical heating methods,” *Society Engineer of Petroleum*.

T. T. Controls, “Skin-effect heating systems.” [Online]. Available:
<http://www.pentairthermal.com/products/engineered-products/skin-effect-heating-systems/>.

U. I. de S. Campo Escuela Colorado, “COLORADO_ 25: WELL COMPLETION DIAGRAM.” 2010.

Vaxa Software, “Tabla de calor específico.” [Online]. Available:
http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/fis/calorespec.pdf.



ANEXOS.

ANEXO A

CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL “TUBING” MODELADO COMO UN CILINDRO HUECO

En el presente anexo, se expone el desarrollo matemático a partir del cual se obtienen los parámetros eléctricos del “tubing” de la tubería de producción simulado como un cilindro hueco. Estos parámetros son la Resistencia Longitudinal y la Inductancia.

A.1 Resistencia Longitudinal[37]

A la hora de hablar de la resistencia de un conductor, tan importante como dar las dimensiones de la pieza es definir de dónde a dónde fluye la corriente.

Las ecuaciones que verifican el campo eléctrico y la corriente son:

- El campo eléctrico es irrotacional, por tratarse de una situación estacionaria, lo que permite usar el potencial eléctrico

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{E} = -\nabla\phi \quad (1)$$

- La densidad de corriente es solenoidal, por tratarse de una distribución estacionaria,

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2)$$

- Se cumple la ley de Ohm

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \quad (3)$$

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Combinando estas ecuaciones obtenemos que, si el material es homogéneo (la conductividad no depende de la posición), el potencial verifica la ecuación de Laplace

$$0 = \nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = -\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = -\sigma \nabla^2 \phi \Rightarrow \nabla^2 \phi = 0 \quad (4)$$

La técnica para hallar la resistencia entre dos superficies entre las cuales hay un material homogéneo, consiste en:

1. Suponer una cierta diferencia de potencial V_0 entre estas superficies.

$$\phi = V_0 \quad (\mathbf{r} \in S_1) \quad \phi = 0 \quad (\mathbf{r} \in S_2) \quad (5)$$

2. Suponer que el por resto de las paredes no entra ni sale corriente, esto es, hay un tubo de corriente de una superficie a la otra.

$$0 = \mathbf{n} \cdot \mathbf{J} \Rightarrow \mathbf{n} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (6)$$

3. Resolver la ecuación de Laplace con estas condiciones de contorno.
4. Hallar el campo eléctrico a partir del potencial.
5. Hallar la densidad de corriente mediante la ley de Ohm.
6. Calcular el flujo de la densidad de corriente a través de la superficie puesta a potencial V_0 . Este flujo es la intensidad de corriente.
7. Dividir la diferencia de potencial entre la intensidad de corriente; el resultado es la resistencia eléctrica.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Si el material no es homogéneo ya el potencial eléctrico no verifica la ecuación de Laplace y puede resultar conveniente prescindir de él y trabajar directamente con la densidad de corriente y el campo eléctrico.

Dada la geometría del sistema, lo más natural es emplear coordenadas cilíndricas.

Por ser un medio homogéneo, el potencial eléctrico verifica la ecuación de Laplace, que en cilíndricas se expresa

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \phi}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

En el caso de la resistencia longitudinal, la diferencia de potencial se establece entre las bases, por lo que las correspondientes condiciones de contorno son

$$\phi = V_0 \quad (z = 0) \quad \phi = 0 \quad (z = h) \quad (8)$$

La condición de que la corriente no escape por las paredes laterales es

$$\mathbf{u}_\rho \cdot \nabla \phi = 0 \Rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial \rho} = 0 \quad (\rho = a \text{ y } \rho = b) \quad (9)$$

Además aunque normalmente se da por supuesto, también deben cumplirse condiciones de contorno periódicas:

$$\phi(0) = \phi(2\pi) \quad \frac{\partial \phi}{\partial \varphi}(0) = \frac{\partial \phi}{\partial \varphi}(2\pi) \quad (10)$$

Este es el problema completo, que puede resolverse de forma deductiva por separación de variables. Sin embargo, no es necesario, ya que viene en nuestra ayuda el teorema de existencia y unicidad. Si encontramos una solución que

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

cumple tanto la ecuación como las condiciones, es la única solución del problema.

Las condiciones de contorno solo dicen que la derivada respecto a ρ se anula en $\rho = a$ y $\rho = b$. No dicen que se anule en el interior, *pero tampoco lo prohíben*.

Así, vamos a hacer la siguiente hipótesis: el potencial depende solo de la coordenada z :

$$\phi = \phi(z) \quad (11)$$

Esta solución obviamente cumple que su derivada respecto a ρ es nula en a y b (porque es nula en todas partes) y también cumple que es periódica en φ (pues no depende de φ). Queda por ver que cumpla la ecuación de Laplace y las condiciones de contorno en z . Sustituyendo en la ecuación, ésta se reduce a

$$\frac{d^2\phi}{dz^2} = 0 \quad (12)$$

que tiene por solución

$$\phi = Az + B \quad (13)$$

Imponiendo ahora las condiciones de contorno en las bases

$$V_0 = \phi(0) = B, \quad 0 = \phi(h) = Ah + B \quad (14)$$

con solución

$$B = V_0 \quad A = -\frac{V_0}{h} \quad (15)$$

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

y resulta finalmente el potencial

$$\phi(\rho, \varphi, z) = \left(1 - \frac{z}{h}\right) V_0 \quad (16)$$

Este potencial cumple la ecuación de Laplace y las condiciones de contorno en las bases, las caras laterales y la periodicidad, por tanto, es la solución (única) del problema.

Conocido el potencial, hallamos el campo y la corriente

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi = \frac{V_0}{h}\mathbf{u}_z \quad \mathbf{J} = \frac{\sigma V_0}{h}\mathbf{u}_z \quad (17)$$

Resulta un campo y una corriente uniformes en la dirección longitudinal.

Integrando ahora sobre una sección transversal resulta

$$I = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \int \left(\frac{\sigma V_0}{h}\mathbf{u}_z\right) \cdot \mathbf{u}_z dS = \frac{\sigma S_0}{h} V_0 \quad (20)$$

de donde la resistencia es

$$R = \frac{h}{\sigma S} = \frac{h}{\sigma \pi (b^2 - a^2)} \quad (21)$$

A.2 CÁLCULO INDUCTANCIA

Sea un conductor cilíndrico hueco, de radios a y b ($a < b$), recorrido por una corriente I de densidad uniforme J . Para determinar la inductancia interna de este conductor, es necesario considerar dos regiones (Figura) en las cuales la fracción

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

de la corriente I que circula por el conductor, concatenada por las líneas de flujo en cada región responde a diferentes leyes:

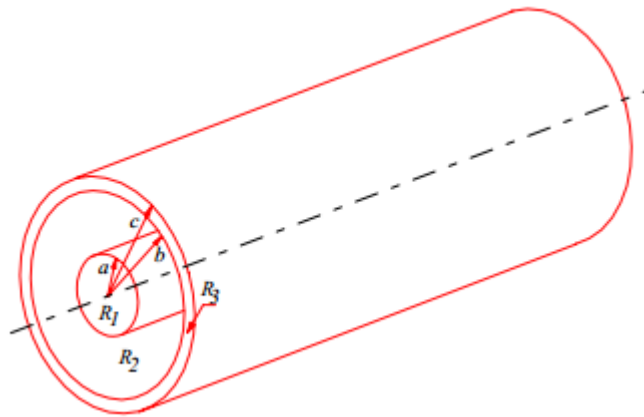
Región 1 ($r < a$):

$$N = 0$$

Región 2 ($a \leq r < b$):

$$N = \frac{I_r}{I} = \frac{J \pi (r^2 - a^2)}{J \pi (b^2 - a^2)} = \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2}$$

Figura A1. Cilindro Hueco.



Fuente: [5]

Es decir, que sólo existe flujo concatenado en la *Región 2* ($a \leq r < b$). La aplicación directa de la ley circuital de Ampere a una trayectoria interna al conductor ($a \leq r < b$), y teniendo en cuenta que \mathbf{B} es constante a lo largo de dicha trayectoria, resulta:

$$\oint \mathbf{B} d\mathbf{l} = B \oint dl = \mu_0 J \pi (r^2 - a^2) = \mu_0 \frac{I}{\pi (b^2 - a^2)} \pi (r^2 - a^2) \quad (22)$$

que conduce a la expresión (empleando coordenadas cilíndricas):

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} \frac{(r^2 - b^2)}{(c^2 - b^2)} \hat{\theta} \quad (23)$$

Consideremos ahora el diferencial de flujo en el interior del conductor, por unidad de longitud, el cual resulta:

$$d\Phi = B dr = \frac{\mu_0 I}{2 \pi (b^2 - a^2)} \frac{1}{r} (r^2 - a^2) dr \quad (24)$$

De acuerdo a lo mencionado en relación a la expresión, el diferencial de flujo concatenado de este elemento de flujo es el diferencial de flujo multiplicado por la fracción de corriente contenida dentro de la trayectoria que encierra al flujo. Es decir, combinando:

$$d\Lambda = \frac{\mu_0 I}{2 \pi} \frac{1}{r} \left[\frac{(r^2 - a^2)}{(b^2 - a^2)} \right]^2 dr = \frac{\mu_0 I}{2 \pi (b^2 - a^2)^2} \left(r^3 - 2a^2 r + \frac{a^4}{r} \right) dr \quad (25)$$

y el flujo total concatenado interno al conductor, por unidad de longitud es:

$$\Lambda = \int_a^b \frac{\mu_0 I}{2 \pi (b^2 - a^2)^2} \left(r^3 - 2a^2 r + \frac{a^4}{r} \right) dr = \frac{\mu_0 I}{2 \pi (b^2 - a^2)^2} \left(a^4 \ln \left(\frac{b}{a} \right) + \frac{1}{4} (b^4 - a^4) - a^2 (b^2 - a^2) \right) \quad (26)$$

o sea:

$$\Lambda = \frac{\mu_0 I}{2 \pi (b^2 - a^2)^2} \left(a^4 \ln \left(\frac{b}{a} \right) - a^2 (b^2 - a^2) + \frac{1}{4} (b^4 - a^4) \right) = \frac{\mu_0 I}{2 \pi (b^2 - a^2)} \left(\frac{a^4}{b^2 - a^2} \ln \left(\frac{b}{a} \right) + \frac{1}{4} (b^2 - 3a^2) \right) \quad (27)$$

De acuerdo a la definición de inductancia propia dada y teniendo en cuenta que la ecuación anterior da el flujo *total* concatenado (por unidad de longitud) *interior* al conductor, la *inductancia interna* por unidad de longitud del conductor resulta:

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

$$L_i = \frac{\Lambda}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi(b^2 - a^2)} \left(\frac{a^4}{b^2 - a^2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{1}{4}(b^2 - 3a^2) \right) \quad (28)$$

Obtengamos ahora la inductancia interna del conductor cilíndrico hueco, en base a consideraciones de energía. La energía almacenada en el campo magnético debido a la inductancia interna del conductor (que pretendemos determinar) puede escribirse:

$$W = \frac{1}{2} L_i I^2 \quad (29)$$

Donde si L_i es la inductancia por unidad de longitud, W es la energía almacenada por unidad de longitud. Por otra parte, sabemos que dicha energía debe ser igual a:

$$W = \frac{1}{2} \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \, dv = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 \, dv \quad (30)$$

siendo:

$$v = \pi(r^2 - a^2) \Rightarrow dv = 2\pi r \, dr \quad (31)$$

Entonces con las dos ecuaciones anteriores, la energía almacenada por unidad de longitud resulta:

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_a^b \left[\frac{\mu_0 I}{2\pi r} \left(\frac{r^2}{b^2 - a^2} - \frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) \right]^2 2\pi r \, dr = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi(b^2 - a^2)^2} \int_a^b \left(\frac{a^4}{r} - 2a^2 r + r^3 \right) dr \quad (32)$$

es decir:

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

$$W = \frac{\mu_0 I^2}{4 \pi (b^2 - a^2)^2} \left(a^4 \ln\left(\frac{b}{a}\right) - a^2(b^2 - a^2) + \frac{1}{4}(b^4 - a^4) \right) = \frac{\mu_0 I^2}{4 \pi (b^2 - a^2)^2} \left(\frac{a^4}{b^2 - a^2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{1}{4}(b^2 - 3a^2) \right) \quad (33)$$

y despejando L_i :

$$L_i = \frac{2W}{I^2} = \frac{\mu_0}{2 \pi (b^2 - a^2)} \left(\frac{a^4}{b^2 - a^2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{1}{4}(b^2 - 3a^2) \right) \quad (34)$$

En la industria petrolera las tuberías de producción varían de acuerdo a las características del yacimiento. De acuerdo con esto, cada pozo de producción posee propiedades únicas. Anteriormente se mencionó que el pozo objeto de investigación es el COL-25 del Campo Escuela Colorado, por consiguiente los cálculos eléctricos y de transferencia de calor realizados son exclusivos para este pozo. Sin embargo, dicho estudio es extensible a otros pozos variando ciertos parámetros propios del pozo.



ANEXO B[13]

Selección del aislamiento térmico-eléctrico del “tubing”

B.1 DESCRIPCIÓN

Lana de vidrio rígida, preformada en forma de medias cañas para aislar tuberías calientes y frías, con temperaturas entre $-84\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-120\text{ }^{\circ}\text{F}$) y $454\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($850\text{ }^{\circ}\text{F}$) y con diámetro nominal desde $\frac{1}{2}$ hasta 12 pulgadas.

USOS

Para aislar sistemas de tuberías que lo requieren, incluyendo las tuberías de transporte de vapor, calefacción, enfriamiento y tuberías especializadas en plantas de potencia y procesos industriales[13].

ESPECIFICACIONES

Conductividad Térmica $K= 0.034\text{ W/m }^{\circ}\text{C}$ a $24\text{ }^{\circ}\text{C}$

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

ESPESOR ÓPTIMO DE TUBERÍAS



Universidad Industrial de Santander

Diámetro Nominal de la Tubería

| | | 1/2 | 3/4 | 1 | 1 1/4 | 1 1/2 | 2 | 2 1/2 | 3 | 3 1/2 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 24 | 30 | 36 | |
|-------------------------|---------------------|-------|-----|-----|-------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Temperatura de Servicio | Espesor Recomendado | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| 150°F (65°C) | $\epsilon=0.2$ | Ts 89 | 90 | 90 | 90 | 91 | 91 | 91 | 88 | 88 | 88 | 88 | 89 | 89 | 89 | 89 | 89 | 89 | 89 | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 |
| | Q | 22 | 25 | 29 | 33 | 36 | 42 | 48 | 45 | 50 | 54 | 64 | 73 | 91 | 110 | 127 | 138 | 156 | 141 | 151 | 182 | 226 | 269 | |

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

ANEXO C

Selección del pozo de producción de Campo Escuela Colorado

Las siguientes tablas corresponden a los resultados del estudio de preselección aplicado por E. Ariza [1] a quince pozos candidatos de ser estudiados para la caracterización de sus cúmulos de parafinas, en términos de los parámetros especificados para cada columna en dichas tablas y a su condición mecánica.

Tabla C1: Características analizadas de cada uno de los primeros cinco pozos activos o factibles de serlo junto a su concepto de aprobación.

| POZO | BL | PROF (ft) | INTERVALO PRODUCT. (ft) | ARENAS PRODUCTORAS | %API | ESTADO MECANICO | GOR PROMEDIO (SCF/STB) | PRODUCCION BOPD (AÑO) | OBSERVACION | RESULTADO |
|--------|----|-----------|-------------------------|--------------------|------|---------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------|---|
| COL-11 | II | 4700 | 3800-4345 | C | 38.5 | | 1000 (1957) | 3 (1985) | No se conocen prob de parafinas | DESCARTADO. No se han registrado prob. De parafinas |
| COL-12 | II | 6070 | 5254-5933 | ED | 35.7 | Bomba (5358-5368') DIC/96 | 5000 (2005) | 2 (2005) | U.B.M | DESCARTADO. UBM |
| COL-16 | I | 4252 | 1496-1805 | CB | 35.6 | Bomba (3181-3191) SEPT/74 | 4000 (1977) | 3 (1977) | Varillas. | DESCARTADO. Varillas en sub |
| | | | 3435-3444 | | | | | | | |
| COL-19 | I | 4130 | 1688-1776 | C | 38.0 | restricción ID 2955-2977 | 5000 (1990) | 2 (1991) | | DESCARTADO. Restricción |
| | | | 2255-2263 | | | | | | | |
| | | | 2928-3526 | | | | | | | |
| COL-37 | VI | 7069 | 2154-2342 | CED | 37.8 | Bomba (4466-4476') OCT/96 | 3000 (2005) | 7 (2005) | U.B.M | DESCARTADO. UBM |
| | | | 3216-3812 | | | | | | | |
| | | | 4872-5236 | | | | | | | |

Fuente: [1]

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Para la tabla C1, se descartaron en general los pozos previstos puesto que poseían unidad de bombeo mecánica, la cual obstaculiza un muestreo completo a la profundidad total de los pozos.

Tabla C2: Características analizadas de cada uno de los siguientes cinco pozos activos o factibles de serlo junto a su concepto de aprobación.

| POZO | BL | PROF (ft) | INTERVALO PRODUCT. (ft) | ARENAS PRODUCTORAS | %API | ESTADO MECANICO | GOR PROMEDIO (SCF/STB) | PRODUCCION BOPD (AÑO) | OBSERVACION | RESULTADO |
|-----------|-------------|-----------|-------------------------|--------------------|------|---|------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| COL-25 | I | 2520 | 2120-2215 | B | 33.3 | No tiene unidad ni varillas. | 2800 (1959) | 6 (1959) | Fluye por periodos. Buena vía | PRESELECCIONADO. |
| COL-38 | I | 4220 | 1812-1943 | B | 36.7 | Bomba (2450-2460') NOV/96 | 2500 (2004) | 10 (2005) | U.B.M | DESCARTADO. |
| | | | 2110-2118 | | | | | | | UBM |
| | | | 3384-3506 | | | | | | | DESCARTADO. |
| COL-57 | VI | 6118 | 3652-3704 | B | NR | No tiene Bomba ni varillas | 5000 (1963) | 10 | Cabeza de pozo mal estado. Drena tem. | No hay facilidades en cabeza de pozo. |
| COL-60 | I | 8886 | 1805-1810 | DCB | 36.4 | Bomba (5292-5300') NOV/84 | 7500 (1986) | 2 (1986) | No dreña. Vía en mal estado | DESCARTADO. |
| | | | 2425-2762 | | | | | | | Bomba subsuelo. |
| | | | 3320-3596 | | | | | | | DESCARTADO. |
| | | | 4275-4294 | | | | | | | DESCARTADO. |
| 5384-5710 | DESCARTADO. | | | | | | | | | |
| COL-64 | II | 3688 | 2622-3438 | B | 35.7 | Se retiro sarta y unidad en 1965 y 1967 respectivamente | 2500 (1980) | 2 (1986) | Fluye por periodos. Vía regular | PRESELECCIONADO. |
| | | | 4872-5236 | | | | | | | PRESELECCIONADO. |

Fuente: [1]

La presente tabla, remarca los únicos dos pozos (Col-25 y Col-64) adecuados para llevar a cabo el estudio debido a que presentan producción formal y relativamente buenas vías de acceso.

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

Tabla C3: Características analizadas de cada uno de los restantes cinco pozos activos o factibles de serlo junto a su concepto de aprobación.

| POZO | BL | PROF (ft) | INTERVALO PRODUCT. (ft) | ARENAS PRODUCTORAS | %PI | ESTADO MECANICO | GOR PROMEDIO (SCF/STB) | PRODUCCION BOPD (AÑO) | OBSERVACION | RESULTADO |
|--------|-----|-----------|-------------------------|--------------------|-----|----------------------------|------------------------|-----------------------|---------------|----------------------|
| COL-69 | III | 6383 | 2133-2338 | CB | NR | Bomba (3181-3191') SEPT/74 | 7500 (2005) | 2 (2005) | U.B.M | DESCARTADO. UBM . |
| COL-70 | II | 3811 | 2957-3166 | B | 39 | Bomba (3349-3359') NOV/96 | 15000 (2005) | 2 (2005) | Activo. U.B.M | DESCARTADO. UBM |
| COL-75 | V | 5700 | 4530-5534 | C | NR | Bomba (4995-5005') ENE/95 | 15000 (2005) | 2 (2005) | U.B.M | DESCARTADO. UBM |
| COL-76 | II | 6192 | 4210-6002 | EDC | NR | Bomba (4524-4540') SEP/97 | 20000 (2005) | 2 (2005) | U.B.M | DESCARTADO. UBM |

U.B.M : Unidad de bombeo mecánico.

Fuente:[1]

Por último, la tabla C3 descarta los cinco pozos restantes por la misma razón de bloqueo u obstrucción de la tabla C1.



ANEXO D

Algoritmo *Ad hoc* descrito en *Matlab*® para la simulación numérica del modelo térmico del pozo COL-25

Este algoritmo comprende las ecuaciones contempladas en el marco teórico para el modelo térmico de un pozo de producción en función de las dimensiones técnicas del pozo COL-25 y de las propiedades térmicas que exhibe el crudo que fluye a través del mismo, así como las de los materiales que imponen la presencia de diversos medios físicos en todo su yacimiento. Su propósito general es determinar las potencias requeridas para el tramo total del “tubing”, con o sin revestimiento de aislamiento, para hacer factible alcanzar las temperaturas de cristalización y de fusión de parafinas en toda la tubería de producción. Adicionalmente, se encuentra bien documentado para facilitar su comprensión y asociación con el desarrollo formal de la temática de la presente tesis.

```
clear all
clc
fprintf('-----\n');
fprintf('Cálculos de las variables involucradas en la solución analítica del modelo
de calentamiento de la tubería de producción\n');
fprintf('-----\n');
fprintf('\n');
%**** Características técnicas del pozo ****
%**** Longitud del pozo en [m]( Longitud original del “tubing” - 2181 ft) ****
```

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

$L_{tu}=664.76;$

%**** Diámetro externo del cemento (Tierra - Revestimiento (“casing”) en [m]) ****

$D_{wb}=0.2190;$ %8 5/8 [Inch] - Dato tomado de la tabla de Excel - Perfil (COL-25)

$R_{wb}=D_{wb}/2;$

%**** Diámetro externo del revestimiento (“casing”) en [m] ****

$D_{co}=0.1682;$ %6 5/8 [Inch] - Grado H-40 - Dato tomado de la tabla de Excel - Perfil (COL-25)

$R_{co}=D_{co}/2;$

%**** Diámetro interno del revestimiento (“casing”) en [m] ****

$D_{ci}=0.1535;$ %6.049 [Inch] - Grado H-40 - Dato tomado de la tabla de Excel - Perfil (COL-25)

$R_{ci}=D_{ci}/2;$

%**** Diámetro externo del aislante térmico (Cañuela en fibra de Vidrio FiberGlass - Revestimiento aislante para la tubería del pozo (“tubing”)en [m] ****

$D_{inso}=0.1143;$ %4.5 [Inch] - Dato tomado de la tabla de Excel - Perfil (COL-25)

$R_{inso}=D_{inso}/2;$

%**** Diámetro interno del aislante térmico (Cañuela en fibra de Vidrio FiberGlass - Revestimiento aislante para la tubería del pozo (“tubing”)en [m] ****

$D_{insi}=0.076;$ %3 [Inch] - Dato tomado de la tabla de Excel -Perfil (COL-25)

$R_{insi}=D_{insi}/2;$

%**** Diámetro externo de la tubería del pozo (“tubing”)en [m] ****

$D_{to}=0.073;$ %2 7/8 [Inch] - Grado N-80 - Dato tomado de la tabla de Excel - Perfil (COL-25)

$R_{to}=D_{to}/2;$

%**** Diámetro interno de la tubería del pozo (“tubing”)en [m] ****

$D_{ti}=0.057;$ %2.259 [Inch] - Grado N-80 - Dato tomado de la tabla de Excel -Perfil (COL-25)

$R_{ti}=D_{ti}/2;$

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

%**** Conductividad térmica del acero (Kt) en [W/m*°K] (Aplicable a la conductividad entre el anular y el fluido de la tubería y en el revestimiento) ****

Kt=50;

Kc=Kt;

%**** Conductividad térmica de la cañuela en fibra de Vidrio FiberGlass en [W/m*°K] (Revestimiento aislante para la tubería del pozo) ****

Kins=0.034;

%**** Conductividad térmica del cemento en [W/m*°K] (Revestimiento de cemento entre el “casing” y la formación (Tierra)) ****

Kcem=1.047;

%**** PARÁMETROS DEL CRUDO, POZO COL-25 ****

%**** Conductividad térmica del crudo en [W/m*°K] ****

Kcru=0.116;

%**** Densidad del crudo en [kg/m^3] (Pozo COL-25 - Página 78, Tesis de Emiliano Ariza => 0,768 gr/cc) ****

Rhoc=768;

%**** Calor específico promedio del fluido (Crudo) en J/kg*°K ****

Cp=1884.06;

%**** Caudal del fluido en [m^3/h] (Producción 10[BOPD]- Dato tomado de la tabla de Excel - Perfil (COL-25))

q=0.06624;

%**** Flujo másico del fluido (Crudo) en [kg/h]

W=Rhoc*q;

%**** TEMPERATURAS ****

%**** Temperatura del punto de nube en °C(Temperatura de cristalización crítica de las parafinas en COL-25 de acorde a la tesis de Emiliano Ariza) ****

Tfnu=32;

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

%**** Temperatura del punto de fusión en °C (Temperatura de fusión de las parafinas en COL-25 de acorde a la tesis de Diana Povedad, dirigida por Emiliano Ariza) ****

Tffu=112;

%**** Temperatura del pozo (COL-25) a condicion normal de operación en °C (T=104 °F de acorde a la tesis de Emiliano Ariza) ****

Tpo=40;

%**** Temperatura promedio en el anular en °C****

Ttoprom=35; % (Temperatura promedio de la sección exterior del “tubing” en °C)

Tciprom=24; % (Temperatura promedio de la sección interior del “casing” en °C)

Tanular=Ttoprom-Tciprom;

%**** Temperatura adimensional (Td) ****

%**** Tiempo adimensional (td) ****

%**** Conductividad de la formación (Tierra seca) [Btu/°F-hr-ft] - [W/m*°K]

Ke=1.5;

%**** Tiempo de producción en segundos

tp=24*3600;

%**** Densidad de la formación (Tierra seca) en [kg/m^3] ****

Rhoe=5540;

%**** Calor específico de la formación (Tierra seca) en J/kg*°K a 25°C y 1 Atm

Ce=1046;

td=(Ke*tp)/(Rhoe*Ce*(Rwb^2));

if td > 1.5

Td=(0.4063+0.5*log(td))*(1+(0.6/td));

else if td <= 1.5

Td=1.1281*sqrt(td)*(1-0.3*sqrt(td));

else

end

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

end

%**** COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR GLOBALES ****

%**** Coeficiente convectivo de transferencia de calor en la tubería(Hto) [W/m²*°K] (35[kcal/h°C*m²] - Tubería forjada en acero)****

Hto=40.705;

%**** Coeficiente convectivo de transferencia de calor en el anular (Hc) [Btu/°F-hr-ft] - [W/m²*°K] (Considerando idealmente solo la presencia de aire)****

%**** Densidad del aire en [lbm/ft³] - [kg/m³]a 50°C y 1 Atm ****

Rhoa=1.09;

%**** Coeficiente de expansión térmica del fluido (Aire) en [1/°K] ****

Betha=3.332*10⁻³;

%**** Viscosidad del fluido (Aire) en [Pa*s] a 50°C ****

Ua=1.95*10⁻⁵;

%**** Conductividad térmica del fluido (Aire) en el anular [Btu/°F-hr-ft] - [W/m*°K]

Ka=0.024;

%**** Calor específico del fluido (Aire)a 50°C en J/kg*°K

Ca=1000;

%**** Número de Prandtl

Pr=(Ca*Ua)/Ka;

%**** Coeficiente convectivo de transferencia de calor en el anular (Hc) [Btu/°F-hr-ft] - [W/m²*°K] (Con aislamiento)****

Hc1=(0.10*(Dci/Dinso)^{0.15})*((((Rhoa²)*Betha*9.8*Tanular)/(Ua²))^{0.3}*Ka*(Rinso^{-0.1})*(Pr^{0.3})

%**** Coeficiente convectivo de transferencia de calor en el anular (Hc) [Btu/°F-hr-ft] - [W/m²*°K] (Sin aislamiento)****

Hc2=(0.10*(Dci/Dto)^{0.15})*((((Rhoa²)*Betha*9.8*Tanular)/(Ua²))^{0.3}*Ka*(Rto^{-0.1})*(Pr^{0.3})

%**** Coeficiente de transferencia de calor por radiación en el anular (Hr) [Btu/°F-hr-ft] - [W/m²*°K] (Considerando idealmente solo la presencia de aire)****

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE



Universidad
Industrial de
Santander

%**** Constante de Boltzman en $[W/m^2 \cdot K^4]$ ($1.73 \cdot 10^{-9}/ft^2 hr \cdot R^4$)

Boltz= $5.6703 \cdot 10^{-8}$;

%**** Emisividad del “tubing” y el “casing” (Considerando que se hallan forjados en acero super rugoso y que su emisividad no difiere con la temperatura)

Eacero=0.96;

$Hr = (Boltz \cdot ((T_{toprom}^2) + (T_{ciprom}^2)) \cdot (T_{toprom} + T_{ciprom})) / ((Eacero^4 - 1) + (R_{to}/R_{ci}) \cdot ((Eacero^4 - 1) - 1))$

%**** Coeficiente global de transferencia de calor (Con aislamiento) ****

$U1 = ((R_{to}/(R_{ti} \cdot H_{to})) + ((R_{to} \cdot \log(R_{to}/R_{ti}))/K_t) + ((R_{to} \cdot \log(R_{inso}/R_{to}))/K_{ins}) + (R_{to}/(R_{ins} \cdot (H_{c1} + Hr)))) + ((R_{to} \cdot \log(R_{co}/R_{ci}))/K_c) + ((R_{to} \cdot \log(R_{wb}/R_{co}))/K_{cem}))^{-1}$

%**** Tasa de flujo de calor por unidad de longitud (Q) en $[W/m]$ ****

%**** Parámetro de relajación (L) ****

$Lr1 = (2 \cdot \pi / (C_p \cdot W)) \cdot ((R_{to} \cdot U1 \cdot K_e) / (K_e + (R_{to} \cdot U1 \cdot T_d)))$

$QA = -Lr1 \cdot W \cdot C_p \cdot (T_{fnu} - T_{po})$

$QB = \text{abs}(-Lr1 \cdot W \cdot C_p \cdot (T_{ffu} - T_{po}))$

%**** Tasa de flujo de calor para la longitud total del “tubing” en $[W/m]$ - Punto de cristalización ****

$Q1 = QA \cdot L_{tu}$

$QZ = QA \cdot L_{tu}$

%**** Tasa de flujo de calor para la longitud total del “tubing” en $[W/m]$ - Punto de fusión ****

$Q2 = \text{abs}(QB \cdot L_{tu})$

%**** Coeficiente global de transferencia de calor (Sin aislamiento) ****

$U2 = ((R_{to}/(R_{ti} \cdot H_{to})) + ((R_{to} \cdot \log(R_{to}/R_{ti}))/K_t) + (1/(H_{c2} + Hr)) + ((R_{to} \cdot \log(R_{co}/R_{ci}))/K_c) + ((R_{to} \cdot \log(R_{wb}/R_{co}))/K_{cem}))^{-1}$

%**** Tasa de flujo de calor por unidad de longitud (Q) en $[W/m]$ ****

%**** Parámetro de relajación (L) ****

$Lr2 = (2 \cdot \pi / (C_p \cdot W)) \cdot ((R_{to} \cdot U2 \cdot K_e) / (K_e + (R_{to} \cdot U2 \cdot T_d)))$

$QC = -Lr2 \cdot W \cdot C_p \cdot (T_{fnu} - T_{po})$

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TUBO DE CONDUCCIÓN DE CRUDO ANTE EL CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE

$$QD=abs(-Lr2*W*Cp*(Tffu-Tpo))$$

%**** Tasa de flujo de calor para la longitud total del “tubing” en [W/m] - Punto de cristalización ****

$$Q3=QC*Ltu$$

%**** Tasa de flujo de calor para la longitud total del “tubing” en [W/m] - Punto de fusión ****

$$Q4=abs(QD*Ltu)$$



Universidad
Industrial de
Santander