

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CRUDO AL  
CALENTARSE EL TUBO DE CONDUCCIÓN APROVECHANDO EL EFECTO  
JOULE: HORNILLA

AUTORES:

HERNANDO ESTEVEZ DUARTE

JORGE LEONARDO MALDONADO QUINTERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2014

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CRUDO AL  
CALENTARSE EL TUBO DE CONDUCCIÓN APROVECHANDO EL EFECTO  
JOULE: HORNILLA

AUTORES:

HERNANDO ESTEVEZ DUARTE

JORGE LEONARDO MALDONADO QUINTERO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTRICISTA

DIRECTOR:

DR. HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

CODIRECTOR:

MS. ALFREDO RAFAEL 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 comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

*“Empieza haciendo lo necesario, después lo posible, y de repente te encontrarás haciendo lo imposible”*

*San Francisco de Asís.*

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres Esperanza Duarte Arguello y Hernando Estevez Hernandez, gracias por darme la oportunidad de ser alguien en la vida, por su apoyo, amor, esfuerzo, y motivación durante este proceso.

A mi Hermana Silvia Estevez Duarte, por todo su apoyo incondicional durante ese largo camino.

*Hernando Estévez Duarte.*

## AGRADECIMIENTOS

Dicen que las oportunidades no se presentan fácilmente dos veces en la vida... pues bien, aprovecharé ésta para decir una vez más ¡Gracias Bendito Dios! Gracias por permitirme y ayudarme a alcanzar este logro que se originó en la mente de un joven inmaduro e indeciso que a sus 17 años soñó con convertirse en un profesional. Infinitas gracias a mis padres, Luis Alfredo Maldonado Vargas y Luz Elena Quintero Castro quienes en medio de las necesidades depositaron su confianza creyendo que era posible mezclar sus sueños y los míos. A mi hermano que en medio de los buenos momentos y discusiones logró motivarme. Si se puede... ánimo Miguel ya queda poco. A Yulisita quien siempre estuvo con las más acertadas palabras de motivación que alguien en medio de la angustia necesita escuchar. Al “Gio”, “Alpi 1” (Iván) y “Alpi 2” (Cristian), y demás compañeros de la U que hicieron ameno este caminar. Así como a Pablo quien aportó chanzas, recocha y comida en los momentos de descanso (que fueron pocos por cierto). Al profesor Hermann Vargas quien a pesar de sus miles de ocupaciones logró orientarnos con la mayor de las disponibilidades propiciando la culminación de este trabajo. Gracias doy a Diego Monroy (Don Diego) que aportó significativamente al desarrollo de este proyecto. Seguro que su apoyo fue importante y necesario.

*“Encomienda a Jehová tus obras, y tus pensamientos serán afirmados”*

*Proverbios 16:3.*

*Jorge Leonardo Maldonado Quintero.*

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	36
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO.....	38
1.1 OBJETIVO GENERAL _____	39
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS _____	39
2. MARCO TEÓRICO .....	40
2.1 CRUDOS PESADOS _____	40
2.2 CRUDOS PARAFÍNICOS _____	45
2.2.1 Proceso de precipitación de parafinas. _____	49

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

2.2.2	Métodos de prevención y eliminación de parafinas en tuberías. _____	51
3.	ESTADO DEL ARTE.....	54
3.1	REPASO CRONOLÓGICO: HISTORIA _____	54
3.2	RESULTADOS DE PRUEBAS UTILIZANDO CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO _____	58
3.3	MÉTODOS DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO: CLASIFICACIÓN _____	60
3.3.1	Calentamiento a alta frecuencia. _____	60
3.3.2	Calentamiento inductivo. _____	61
3.3.3	Calentamiento eléctrico resistivo. _____	62
3.4	EQUIPOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS EN EL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO _____	62
3.4.1	Dispositivo de calentamiento patentado por Stegemeier. _____	63
3.4.2	Sistemas de calentamiento por casing. _____	65

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

3.4.3	Calentamiento del crudo en ascenso por la tubería, utilizando cable de calefacción eléctrica. _____	66
3.4.4	Calentadores eléctricos de fondo de pozo. _____	67
3.4.5	Sistema de calentamiento por inducción. _____	69
3.4.6	Calentamiento eléctrico en pozos horizontales. _____	70
3.4.7	Aplicaciones Comerciales. _____	70
3.4.7.1	Sistema de calentamiento en fondo de pozo desarrollado por Lynbrook Heating Technologies.....	71
3.4.7.2	El “Tracer STS Skin-efecct: Sistema de Traceado Eléctrico” de la empresa Tyco Thermal Controls.....	72
4.	MODELADO DE LA TEMPERATURA DEL CRUDO .....	74
4.1	POZO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CALENTAMIENTO PROPUESTO _____	74
4.2	ESTADO MECÁNICO ACTUAL DEL POZO C25 _____	76
4.3	PERFIL DE TEMPERATURA DEL CRUDO EN C25 _____	79

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

4.4	MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL POZO_____	82
4.4.1	Conducción._____	82
4.4.2	Convección._____	83
4.4.3	Radiación. _____	85
4.5	CONSIDERACIONES EN LA ELABORACIÓN DEL MODELO _____	87
4.5.1	Modelado de la transferencia de calor para el sistema crudo-tubing-casing-cemento en estado transitorio. _____	90
4.5.2	Transferencia de calor en el anular. _____	94
4.5.3	Modelo de la variación de la temperatura de la formación con la profundidad._____	96
4.5.4	Modelado de transferencia de calor en estado estable: Después del calentamiento realizado por la hornilla. _____	96
4.5.5	Modelo de temperatura del crudo al pasar por la sección donde se ubica la hornilla.101	
4.5.6	Solución del modelo térmico._____	103

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

5.	SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL CRUDO SECCIÓN HORNILLA.....	107
5.1	DISTRIBUCIÓN DE MEDIOS CON LA TOOLBOX EMPLEADA _____	107
5.2	RESULTADOS DE SIMULACIÓN _____	110
5.2.1	Resultados de simulación de hornilla a 185 m de profundidad.....	110
5.2.2	Resultados de simulación de hornilla a 610,21 m de profundidad. ____	113
6.	SISTEMA DE CALENTAMIENTO.....	117
6.1	ESTRUCTURA FÍSICA DE LA HORNILLA.....	118
6.1.1	Aislantes Térmicos.....	120
6.1.1.1	Selección del aislante térmico.....	123
6.1.2	Resistencia Calefactora. _____	126
6.1.2.1	Cálculo de la resistencia calefactora.....	134
6.1.3	Lámina de protección. _____	138
6.1.4	Conectores resistencia de calentamiento-cable de potencia. _____	140

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

6.2	CABLES DE POTENCIA .....	141
6.2.1	Selección de tipo de cable según recubrimiento aislante. ....	142
6.2.2	Calibre del conductor. ....	151
6.3	FUENTE DE ENERGÍA .....	152
6.3.1	Protección de transformador trifásico. ....	153
7.	CONCLUSIONES .....	155
8.	RECOMENDACIONES .....	157
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	158
	BIBLIOGRAFÍA .....	162
	ANEXOS.....	166

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Muestra de crudo.....	41
Figura 2. Cambio de la viscosidad del crudo con el aumento de la temperatura...42	
Figura 3. Estructura molecular de las parafinas normales .....	45
Figura 4. Estructura molecular de las Isoparafinas .....	46
Figura 5. Estructura molecular de los naftenos o cicloparafinas .....	46
Figura 6. Estructura molecular de los aromáticos .....	47
Figura 7. Representación de las parafinas.....	47
Figura 8. Taponamiento de tubería de extracción de crudo.....	49
Figura 9. Proceso de formación de cristales de parafinas .....	50

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 10. Estructura de calentadores de pozos verticales trifásicos .....	55
Figura 11. Inyección de corriente a través del tubing.....	56
Figura 12. Esquema de calentamiento de alta frecuencia concentrado.....	57
Figura 13. Comportamiento de diferentes materiales con distinto valor de permitividad.....	61
Figura 14. Dispositivo de calentamiento patentado por Stegemeier .....	64
Figura 15. Sistema de calentamiento por casing .....	65
Figura 16. Esquema de dispositivo que utiliza un cable calefactor que envuelve el tubing .....	66
Figura 17. Esquema de un dispositivo que utiliza un cable calefactor ubicado en el fondo del pozo .....	68
Figura 18. Sistema de calentamiento por inducción .....	69
Figura 19. Sistema de calentamiento en pozos horizontales.....	70
Figura 20. Sistema de calentamiento en fondo de pozo desarrollado por Lynbrook Heating Technologies .....	71

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 21. Sistema de traceado eléctrico de la empresa Tyco Thermal Controls .72

Figura 22. Ubicación del Campo Escuela Colorado.....75

Figura 23. Cabeza del pozo C25 y vía de acceso al sitio.....76

Figura 24. Estado mecánico actual pozo C25.....77

Figura 25. Muestra de crudo tomada del pozo C25 .....81

Figura 26. Transferencia de calor por convección .....84

Figura 27. Medios presentes en fondo de pozo .....87

Figura 28. Distribución del calor transferido por la hornilla .....89

Figura 29. Balance de energía sobre un elemento infinitesimal.....91

Figura 30. Diagrama de balance de masa y energía .....97

Figura 31. Modelo de resistencias térmicas en estado estable..... 101

Figura 32. Balance de energía del crudo ..... 102

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 33. Comportamiento de la temperatura del crudo en el proceso de calentamiento propuesto.....	106
Figura 34. Interfaz gráfica de la Toolbox empleada con la distribución de medios presentes en pozo .....	108
Figura 35. Enmallado de simulación.....	109
Figura 36. Hornilla de 2 m de longitud ubicada a 185 m de profundidad .....	110
Figura 37. Hornilla de 2,5 m de longitud ubicada a 185 m de profundidad .....	111
Figura 38. Hornilla de 3 m de longitud ubicada a 185 m de profundidad .....	112
Figura 39. Hornilla de 2 m de longitud ubicada a 610,21 m de profundidad .....	113
Figura 40. Hornilla de 2,5 m de longitud ubicada a 610,21 m de profundidad .....	114
Figura 41. Hornilla de 3 m de longitud ubicada a 610,21 m de profundidad .....	115
Figura 42. Vista lateral (corte): Diseño de la hornilla de calentamiento .....	119
Figura 43. Aislante térmico a emplear para la sección de la hornilla .....	124
Figura 44. Conductividad térmica del aislante en función de temperatura promedio .....	125

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 45. Conexión de las resistencias empleadas en la hornilla.....	126
Figura 46. Conexión de las resistencias calefactoras .....	135
Figura 47. Distribución de los componentes del sistema de calentamiento .....	138
Figura 48. Lámina de acero galvanizado para proteger el aislante térmico de la hornilla .....	139
Figura 49. Conector resistencia eléctrica-cable de potencia.....	140
Figura 50. Conductor sólido.....	143
Figura 51. Conductor trenzado .....	143
Figura 52. Conductor compacto.....	144
Figura 53. Máxima corriente que puede soportar el conductor para diferentes temperaturas de operación .....	150
Figura 54. Diagrama unifilar de sistema de calentamiento. ....	166
Figura 55. Modelo físico considerado para la tubería de producción.....	167
Figura 56. Espacio físico considerado en el modelado.....	169

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 57. Representación por resistencias térmicas de sistema crudo-tubing-espacio anular-casing-cemento. ....173

Figura 58. Distribución de las hornillas calefactoras a lo largo del tubing.....177

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tabulación viscosidad-temperatura para cuatro grados API.....	43
Tabla 2. Composición química de los tipos de hidrocarburos.....	43
Tabla 3. Pruebas de calentamiento electromagnético .....	59
Tabla 4. Datos básicos C25.....	75
Tabla 5. Características térmicas y mecánicas del pozo C25.....	78
Tabla 6. Variación del punto de cristalización de parafina .....	80
Tabla 7. Conjunto de ecuaciones del modelo en estado estable del comportamiento térmico del crudo.....	104
Tabla 8. Condiciones de operación de las hornillas.....	105
Tabla 9. Características de las aleaciones de resistencias eléctricas.....	129
Tabla 10. Conductividad térmica de aleaciones Ni-Cr-Fe.....	130

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 11. Características principales de las aleaciones de Fe-Cr-Al .....	131
Tabla 12. Resistividad eléctrica de las aleaciones Fe-Cr-Al .....	133
Tabla 13. Características de las resistencias eléctricas.....	137
Tabla 14. Nomenclatura de cable modular .....	147
Tabla 15. Tipos de conductores usados para energizar bombas electrosumergibles .....	148
Tabla 16. Especificaciones técnicas de conductor seleccionado.....	151
Tabla 17. Características del cable de potencia .....	152
Tabla 18. Parámetros para la selección de equipos de protección y maniobra en media tensión.....	154

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Diagrama unifilar de sistema de calentamiento.....	166
ANEXO B. Modelo físico considerado para la tubería de producción .....	167
ANEXO C. Modelo matemático de los medios del pozo tratados como resistencias térmicas .....	169
ANEXO D. Cálculo del calibre del conductor que alimenta cada hornilla .....	176
ANEXO E. Código en matlab para la solución del modelo en estado estable .....	179

## NOMENCLATURA

Ba	Coeficiente de expansión térmica del aire en el anular, [1/°C].
C	Calor específico, [J/kg*°K].
Ca	Calor específico del aire en el espacio anular, [J/kg*°K].
Ce	Calor específico de la formación, [J/kg*°K].
Cp	Calor específico del crudo, [J/kg*°K].
C <sub>J</sub>	Coeficiente Joule-Thomson, [°F/psi].
σ	Constante de Stefan-Boltzman, [W/m <sup>2</sup> * °K <sup>4</sup> ].
D <sub>ci</sub>	Diámetro interno del casing, [m].
d <sub>to</sub>	Diámetro externo del tubing, [m].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

e Suma de “ec”, “ep” y “u” por unidad de masa, [J/kg].

ec Energía cinética por unidad de masa, [J/Kg].

ep Energía potencial por unidad de masa, [J/Kg].

$\epsilon_{to}$  Emisividad de la pared externa del tubing, [-].

$\epsilon_{ci}$  Emisividad de la pared interna del casing, [-].

$F_c$  Factor de corrección para otras conexiones, [-].

g Gravedad, [m/s<sup>2</sup>].

gG Gradiente geotérmico, [°C/m].

h Coeficiente de convección, [W/m<sup>2</sup> \* °K<sup>4</sup>].

hf Coeficiente de convección del aire, [W/m<sup>2</sup> \* °K<sup>4</sup>].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Hr	Coeficiente de radiación, $[W/m^2 * ^\circ K^4]$ .
H	Entalpia del fluido, $[J/Kg]$ .
I	Corriente, $[A]$ .
K	Conductividad térmica, $[W/m*^\circ K]$ .
Ka	Conductividad térmica del aire en el espacio anular, $[W/m*^\circ K]$ .
Kcem	Conductividad térmica del cemento, $[W/m*^\circ K]$ .
Ke	Conductividad térmica de la formación, $[W/m*^\circ K]$ .
K <sub>g</sub>	Constante de regulación generalizada, $[V^3/VA * m]$ .
Kp	Conductividad térmica del crudo, $[W/m*^\circ K]$ .
M	Momento eléctrico, $[kVA*m]$ .

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

$\eta$  Viscosidad, [C<sub>p</sub>].

$P_{\text{disipada}}$  Potencia disipada, [W].

$\rho_a$  Densidad del aire en el anular, [kg/m<sup>3</sup>].

$\rho$  Densidad, [kg/m<sup>3</sup>].

$\rho_e$  Densidad de la formación, [kg/m<sup>3</sup>].

$\rho_p$  Densidad del crudo, [kg/m<sup>3</sup>].

$P$  Presión del fluido, [N/m<sup>2</sup>].

$Pr$  Número de Prandtl, [-].

$Prof_p$  Profundidad de pozo, [m].

$\dot{Q}$  Transferencia de calor que debe entregar la hornilla, [W].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

$r_{ti}$  Radio interno del tubing, [m].

$r_{to}$  Radio externo del tubing, [m].

$r_{ci}$  Radio interno del casing, [m].

$r_{co}$  Radio externo del casing, [m].

$r_{cem}$  Radio externo del cemento, m.

$L$  Longitud del tubing, [m].

$t$  Tiempo de producción, [s].

$t_D$  Tiempo dimensional, [-].

$T_{amb}$  Temperatura ambiente, [°C].

$T_{ci}$  Temperatura de la superficie interna del casing, [°C].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

$T_{to}$	Temperatura de la superficie externa del tubing, [°C].
$T_f$	Temperatura del crudo, [°C].
$T_p$	Temperatura fondo de pozo, [°C].
$u$	Energía interna por unidad de masa, [J/kg].
$\mu_a$	Viscosidad del aire en el espacio anular, [kg/m*s].
$U_{to}$	Coeficiente de transferencia de calor total, [W/m <sup>2</sup> * °K].
$V$	Velocidad del fluido, [m/s].
$V_{esp}$	Volumen específico, [m <sup>3</sup> /kg].
$w$	Flujo másico, [kg/s].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

## GLOSARIO

**Abrasión:** Desgaste causado por acción mecánica

**API:** American Petroleum Institute, formada en 1917. Es una organización sin ánimo de lucro, que sirve para coordinar y promover el interés de la industria petrolera en su relación con gobiernos y otros.

**Casing:** Tubería de acero con el mismo diámetro de la broca que crea el pozo. Su función es contener la perforación evitando que se derrumbe el pozo. Posee orificios en la pared en diferentes profundidades a lo largo del yacimiento de los estratos de petróleo.

**Formación:** Terreno en el subsuelo adyacente al pozo petrolífero.

**Grado API:** Es la medida de cuánto pesa el crudo en relación al agua. Entre más alto sea este grado, más liviano es el crudo (flota en el agua si es mayor a 10).

**Gravedad específica:** Comparación de la densidad de una sustancia con la densidad del agua. Es decir, el peso unitario de la sustancia dividido en el peso unitario del agua destilada.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**Hornilla:** Dispositivo de calentamiento dispuesto concéntricamente con el tubing.

**Parafinas:** Son precipitaciones de una mezcla heterogénea compuesta por cristales menores que se agrupan.

**Punto de cristalización:** También llamado punto nube, es la temperatura a la cual comienza a formarse el primer cristal de parafina.

**Resistencia a la rotura:** Tracción, compresión o esfuerzo de cizalladura que puede resistir un material sin romperse. También llamada carga unitaria de rotura.

**Somero:** Casi encima o muy próximo a la superficie. Ligero, superficial, hecho con poca reflexión.

**Temperatura:** Propiedad de un material relacionada con la sensación de calor o frío que se siente en contacto con ella.

**Temperatura de fusión:** Temperatura necesaria para la ocurrencia del cambio de estado sólido a líquido en una sustancia.

**Temperatura máxima de utilización:** Temperatura máxima a la que puede estar sometido un cuerpo sin que cambien sus propiedades de forma.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**Tubing:** Tubería de producción encargada de transportar el hidrocarburo desde fondo de pozo hasta la superficie.

**Yacimiento:** Depósito o reservorio petrolífero es decir una acumulación natural de hidrocarburos en el subsuelo contenidos en rocas porosas o fracturadas.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

## RESUMEN

**TÍTULO:** MODELADO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL CRUDO AL CALENTARSE EL TUBO DE CONDUCCIÓN APROVECHANDO EL EFECTO JOULE: HORNILLA<sup>1</sup>

**AUTORES<sup>2</sup>:** Hernando Estévez Duarte.

Jorge Leonardo Maldonado Quintero.

**PALABRAS CLAVES:** Crudo Parafínico, Calentamiento Eléctrico, Hornilla, Pozo, Transferencia de Calor, Campo Escuela Colorado, Conductividad Térmica.

**CONTENIDO:** EL calentamiento eléctrico es una técnica de estimulación térmica en la que una corriente eléctrica se hace pasar a través de un elemento resistivo generando calor y transfiriéndolo al crudo. Es empleada en campos de petróleo pesado para reducir su viscosidad y facilitar su extracción. También se emplea en pozos con problemas de precipitación de parafinas, en el cual se necesita que la temperatura esté por encima del punto de cristalización.

En este trabajo de investigación se desarrolla un modelo para determinar la temperatura del crudo, asumiendo que tiene una sola fase, en cualquier parte del tubing y que está siendo calentado por la hornilla, con lo cual se puede determinar la potencia que debe entregar la hornilla a el crudo para evitar que su temperatura descienda por debajo del punto de cristalización. Además se realiza una simulación térmica de la sección donde se acopla la hornilla, utilizando el programa PDETOOL de Matlab. Se presenta el funcionamiento y diseño de la hornilla, en donde se especifican las dimensiones, el tipo de material para su construcción fuente de alimentación y equipos necesarios para la inyección de corriente.

Como caso de estudio se elige el pozo C25 de Campo Escuela Colorado, que a lo largo de su vida útil ha presentado problemas de precipitación y acumulación de parafinas, ocasionando la obstrucción y taponamiento de la tubería. Es para las características propias de este pozo, que se espera mejorar la movilidad del crudo en el proceso de extracción.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado.

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Hermann Raúl Vargas Torres. Codirector: Alfredo Rafael Acevedo Picón.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

## ABSTRACT

**TITLE:** MODELING AND SIMULATION OF OIL'S BEHAVIOR WHEN HEATING PRODUCTION PIPE, TAKING ADVANTAGE OF JOULE'S EFFECT: BURNER.<sup>3</sup>

**AUTHORS<sup>4</sup>:** Hernando Estévez Duarte.

Jorge Leonardo Maldonado Quintero.

**KEY WORDS:** Paraffinic Crude, Electrical Heating, Burner, Well, Heat Transfer, Colorado School Field, Thermal Conductivity.

**CONTENT:** Electrical heating is a thermal stimulation technique in which an electric current is passed through a resistive element generating heat and transferring it to the crude oil. It is used in heavy oil fields to reduce its viscosity and facilitate its extraction. It's also used in wells with paraffin precipitation problems, which require that the temperature is above the crystallization point.

In this research is developed a model for determining the oil's temperature, assuming it presents a single phase, anywhere in the tubing that is being heated by the burner, with which one can determine the power required to be delivered by the oil burner to avoid its temperature drops below the crystallization point. Besides that, a thermal simulation is performed in the section where the burner is coupled, using the Matlab toolbox PDETOOL. It's presented the performance and design of the burner, specifying the dimensions, type of material for its construction, power supply and equipment required for the current injection.

As a case study the well C25 of Campo Escuela Colorado was selected, which throughout its life has presented problems of precipitation and accumulation of paraffins, causing blockage and plugging of the pipes. It is for the characteristics of this well, where is expected to improve mobility in the oil extraction process.

---

<sup>3</sup> Bachelor thesis.

<sup>4</sup> Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Advisor: Hermann Raúl Vargas Torres. CoAdvisor: Alfredo Rafael Acevedo Picón.

## INTRODUCCIÓN

El sector energético juega un papel importante en el desarrollo de las naciones. Como principal fuente de energía a nivel mundial se tiene la industria del petróleo a pesar de no ser una fuente renovable.

Actualmente existe un afán por satisfacer la demanda de energía, ya que ésta va en aumento y no se encuentran grandes fuentes con la facilidad de antes (como es el caso del petróleo). Es por esto que se realizan investigaciones en busca de fuentes de energía renovable para así reducir la dependencia energética que se tiene de este recurso. Sin embargo no se ha encontrado un sustituto suficientemente viable.

Hoy día, las grandes reservas que se tienen en el mundo de este preciado recurso, son de crudos pesados y extra-pesados, que por la complejidad de sus moléculas hacen que sean muy densos, acarreando altos costos en el proceso de extracción. Por otra parte se encuentran los crudos parafínicos que fluyen con facilidad a condiciones del yacimiento pero que una vez alcanzan su temperatura nube, se presenta un fenómeno de cristalización que se puede desencadenar en precipitación durante el procedimiento de extracción al pasar por el tubing. Éste resulta ser un problema de suprema importancia ya que si no se frena el proceso de cristalización el taponamiento de la tubería de conducción es inminente.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Por tal motivo, la industria petrolera ha invertido en investigación con el fin de desarrollar técnicas que eviten la acumulación de cristales de parafina en las paredes internas del tubing (objeto del presente proyecto de investigación). Estas técnicas van desde tratamientos químicos hasta herramientas eléctricas, empleadas para elevar la temperatura del crudo en ascenso.

Una de las técnicas utilizadas es el calentamiento electromagnético. Dentro de éstas se encuentra el calentamiento eléctrico resistivo, que consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de un elemento resistivo para generar calor transfiriéndolo al crudo que está siendo transportado por el tubing hasta la superficie. Este calentamiento puede realizarse empleando la tubería de producción como medio de generador de calor, o utilizando un calentador de fondo de pozo. De todos modos, el fin es mejorar la movilidad del crudo en el pozo, ya que se disminuye la viscosidad y se evita que se depositen parafinas.

Éste último es el enfoque de esta investigación, al analizar el comportamiento térmico que tiene el crudo calentándose el tubing por medio de un elemento resistivo llamado hornilla bajo ciertas condiciones establecidas<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Elemento resistivo ubicado alrededor del tubo de producción generando calor focalizado concentrado en el área de contacto entre la hornilla y el tubing. Esta herramienta se explica con más detalle en el desarrollo del presente documento.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

El Campo Escuela Colorado, se reconoce como un campo maduro. Durante su explotación ha presentado problemas de precipitación de parafinas, generadas por la reducción de la temperatura en los fluidos a lo largo del proceso de extracción y recolección.

Las ceras parafínicas son muy valiosas como derivados del petróleo y de amplio uso industrial, pero el gran reto es producir y transportar el crudo que las contiene [1].

En la extracción del crudo parafínico, se presentan grandes inconvenientes al intentar asegurar un flujo continuo por el ducto que lo transporta (tubing), causando pérdidas de producción. Por tanto, se requieren esfuerzos técnicos y económicos en los mantenimientos preventivos y correctivos en todo el sistema de extracción debido a la cristalización y acumulación de parafinas a lo largo de la tubería de producción razón por la cual, las empresas petroleras invierten fuertes sumas de dinero en tecnología e investigación.

Para implementar cualquier método de control de parafinas se requiere primero conocer las condiciones de presión, temperatura y demás factores, bajo los cuales ocurre la cristalización y la precipitación. Es decir, es prioritario caracterizar el espacio termodinámico bajo el cual sucede el fenómeno.

Con base en lo anteriormente expuesto, el actual trabajo centra su atención en modelar y simular el comportamiento que tiene el crudo desde el punto de vista térmico, al realizar un procedimiento de transferencia de calor desde el elemento resistivo de calentamiento (hornilla), esperando que la fluidez del crudo mejore reduciendo la formación de cristales de parafina.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Modelar y simular el comportamiento del crudo a lo largo de la tubería de producción cuando se eleva su temperatura, utilizando como medio de transferencia de calor el método de la hornilla para las características del pozo C25 del Campo Escuela Colorado.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

El cumplimiento del objetivo general del presente trabajo de grado comprende:

1. Modelar y simular el comportamiento térmico del crudo parafínico del pozo C25 del Campo Escuela Colorado en cualquier punto de la tubería de extracción, para hallar la temperatura al ser calentado por la hornilla.
2. En la simulación se debe tener en cuenta 3 distintas longitudes de la hornilla (2, 2.5 y 3 metros) para mejorar en la movilidad del crudo previniendo la acumulación de ceras parafínicas.
3. Definir las necesidades de corriente, potencia y tensión eléctrica que requiera la hornilla.
4. Seleccionar las características del equipo y elementos de alimentación que se tienen para la inyección de corriente.

## 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se dan a conocer las características de los crudos parafínicos y la forma en que mejora su movilidad al aumentar su temperatura. Así en la sección 2.1 se define que es un crudo pesado, los problemas que se tienen en su extracción y como aumentar su movilidad al aplicar métodos de calentamiento. En la sección 2.2 se definen las características de los crudos que presentan precipitación de parafinas, y cómo se puede disminuir la formación de las mismas empleando métodos térmicos.

### 2.1 CRUDOS PESADOS

Los crudos pesados poseen una viscosidad elevada y generalmente una densidad alta. La viscosidad es la resistencia de los líquidos a fluir cuando se aplica una fuerza. Esto debido al rozamiento entre sus moléculas. Cuanto más viscoso es el líquido, más lento fluye.

La unidad que se emplea en la viscosidad es el Poise definido como la fuerza necesaria para mover un centímetro cuadrado de área sobre una superficie paralela a la velocidad de un 1cm por segundo. Las equivalencias con el Poise son Pascal-segundo  $[(N \cdot s)/s^2]$ .

La propiedad más importante para el productor<sup>6</sup> de hidrocarburos es la viscosidad, ya que determina que tan fácil fluirá el petróleo. Por otra parte, la densidad es más

---

<sup>6</sup> Quien extrae el crudo del yacimiento.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

importante para el refinador de petróleo, porque es un mejor indicador de los derivados de destilación [2].

Figura 1. Muestra de crudo



Fuente: [2].

Aun teniendo en cuenta lo anterior, los crudos tienen una particularidad, y es que no hay una relación clara entre las dos. Es decir, un crudo de mediana, o baja densidad, con alto contenido de parafina en un yacimiento frío y somero puede presentar una viscosidad más alta que un petróleo crudo pesado, libre de parafina, en un yacimiento profundo y con alta temperatura.

La viscosidad puede variar en gran medida con la temperatura; por el contrario, la densidad varía poco con la temperatura y se ha convertido en el parámetro estándar del campo petrolero más comúnmente utilizado para categorizar los petróleos [2].

Sin embargo se ha implementado una clasificación mediante los grados API (Instituto Americano del Petróleo) y está relacionada con la gravedad específica del crudo. Mientras más denso sea el petróleo más baja es su densidad API [2].

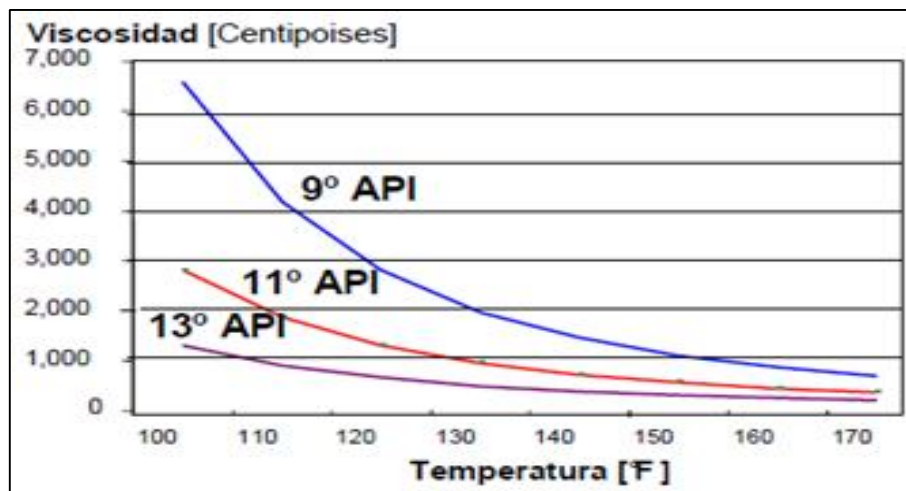
Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

La siguiente es una clasificación hecha por el Instituto Americano del Petróleo:

- Extrapesados (<9.9° API).
- Pesados (10°API-21.9°API).
- Medianos (22,0°API-29.9°API).
- Livianos (30°API-39.9°API).
- Condensados (>40°API).

La viscosidad disminuye con el aumento de temperatura y viceversa como se aprecia en la figura 2 y tabla 1. También se observa en ésta que para un cambio de temperatura, la variación en la viscosidad es más grande en los crudos con viscosidades altas:

Figura 2. Cambio de la viscosidad del crudo con el aumento de la temperatura



Fuente: [3].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 1. Tabulación viscosidad-temperatura para cuatro grados API

Gravedad °API	100°F	120°F
9°	6,597 Cp	2,809 Cp
11°	2,826 Cp	1,306 Cp
13°	1,314 Cp	0,654 Cp
15°	0,657 Cp	0,350 Cp

Fuente: [3].

Además los crudos pesados se caracterizan por estar compuestos por una mezcla de varios hidrocarburos que varían en tipo, peso molecular, y punto de ebullición (Ver tabla 2).

Tabla 2. Composición química de los tipos de hidrocarburos

Componentes	Composición Química
Parafinas	$C_nH_{2n+2}$
Olefinas(Naftenos)	$(C_nH_{2n})_x$
Polimetilenos	$C_nH_{2n-2}$
Acetilenos	$C_nH_{2n-4}$
Tarpenos	$C_nH_{2n-4}$
Bencenos	$C_nH_{2n-6}$

Fuente: [3].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Generalmente en el reservorio, la viscosidad del petróleo es baja ya que en el fondo del pozo la temperatura es elevada, y a medida que asciende por el tubing, el crudo pierde temperatura debido al intercambio de calor. Esto obliga a que las bombas extractoras operen a su máxima capacidad, lo que significa que la limitante de la rata de producción de un pozo, no sea su capacidad productiva sino la capacidad de bombeo, la cual estaría al máximo. [3]

Además, el esfuerzo a que se someten las bombas, puede ocasionar que éstas presenten fallas o se dañen prontamente, lo que requiere labores de reparación que pueden tomar días, propiciando situaciones desfavorables en la producción.

La viscosidad de un fluido depende de la temperatura, las fuerzas intermoleculares del fluido, el tamaño de sus moléculas, su masa molecular y otros factores estructurales.

Los crudos poseen curvas empíricas que son características de su viscosidad en función de la temperatura. Sin embargo, para el cálculo analítico se propone la variación del coeficiente de viscosidad como la variación de temperatura en un fluido laminar, como se muestra en la ecuación (1). [4]

$$\eta = k * e^{\frac{E_a}{R*\Delta T}} \quad (1)$$

Dónde:

k: es constante.

$E_a$ : Energía de activación.

R: Constante de gases ideales.

$\Delta T$ : Diferencia de temperatura.

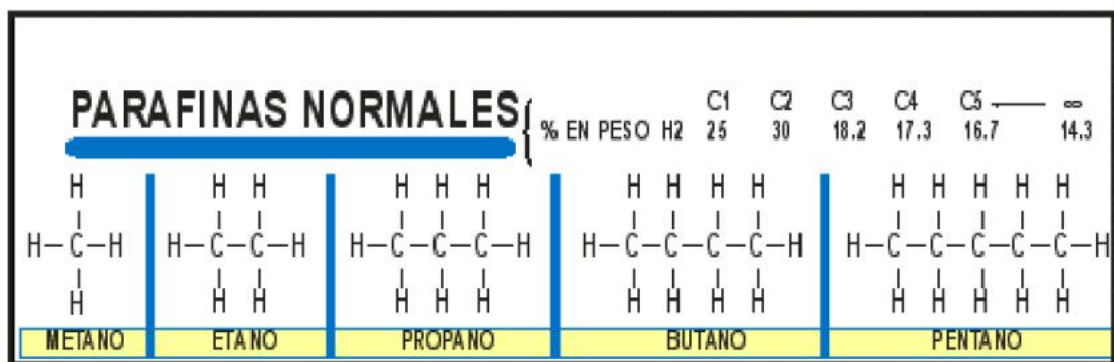
Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

En esta ecuación (1) se puede evidenciar que un aumento en la temperatura ocasiona que la viscosidad disminuya. Es por esto que los métodos de calentamiento (entre ellos el eléctrico), son efectivos para mejorar la movilidad del crudo.

## 2.2 CRUDOS PARAFÍNICOS

Las ceras parafínicas, se componen en su mayoría de parafinas normales, que son acompañadas de isoparafinas y en menor proporción por ciclo parafinas. Estas estructuras moleculares se pueden evidenciar en las figuras 3, 4, 5, 6 y 7.

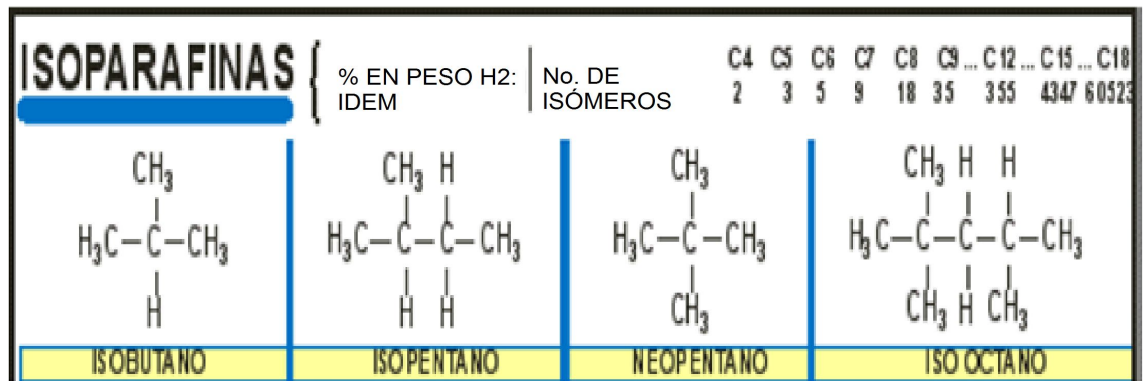
Figura 3. Estructura molecular de las parafinas normales



Fuente:[5].

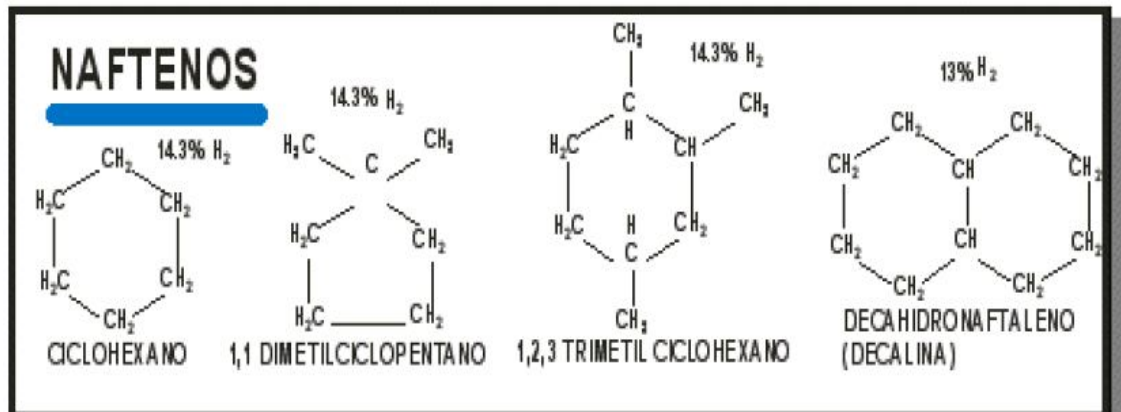
Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 4. Estructura molecular de las Isoparafinas



Fuente:[5].

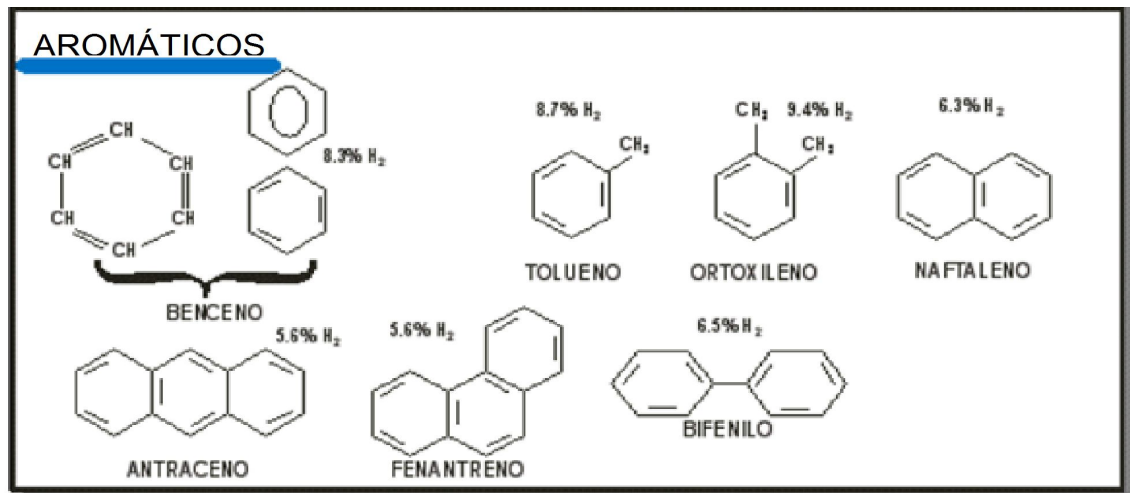
Figura 5. Estructura molecular de los naftenos o cicloparafinas



Fuente:[5].

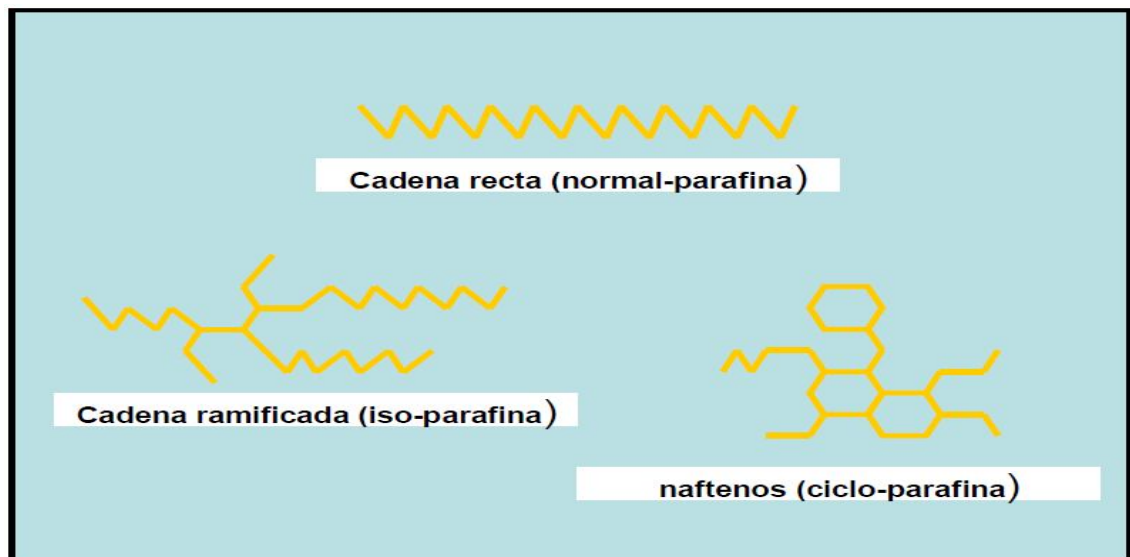
Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 6. Estructura molecular de los aromáticos



Fuente:[5].

Figura 7. Representación de las parafinas



Fuente: [5].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Los crudos parafínicos son de color claro, fluidos y de baja densidad (0,75 a 0,85 g/mL). De éstos se extrae gran cantidad de gasolina, queroseno y aceites lubricantes. Se caracterizan porque contienen más del 50% de hidrocarburos saturados y dentro de estos superior al 40% del tipo alcanos o parafínicos [5].

Los depósitos de parafina pueden generar los siguientes problemas en la extracción de crudos [5]:

- Se pueden presentar cambios en el crudo en cuanto a sus características reológicas.
- Se requerirá potencia de más con el fin de asegurar un flujo continuo.
- Se reduce la producción del hidrocarburo ya que el área interna de la tubería de producción y transporte se ve reducida.
- Los equipos en pozo y superficie pueden presentar fallas.
- Mantenimiento de equipos más frecuente.

Es por las consecuencias anteriormente descritas y más, que los interesados en el sector petrolero (empresas estatales y multinacionales) invierten esfuerzos técnicos y económicos en la prevención y remediación de parafinas.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**2.2.1 Proceso de precipitación de parafinas.** En el yacimiento generalmente, la solubilidad de los componentes parafínicos es suficientemente alta para mantener estas moléculas totalmente disueltas en la mezcla. Cuando el crudo se transporta hasta la superficie, éste transfiere calor al medio y por lo tanto su temperatura baja y puede dar inicio al proceso de cristalización de parafinas en las paredes del tubing. Algunas veces llegando a reducir su diámetro y en casos más extremos a taponarlo (ver figura 8).

Figura 8. Taponamiento de tubería de extracción de crudo



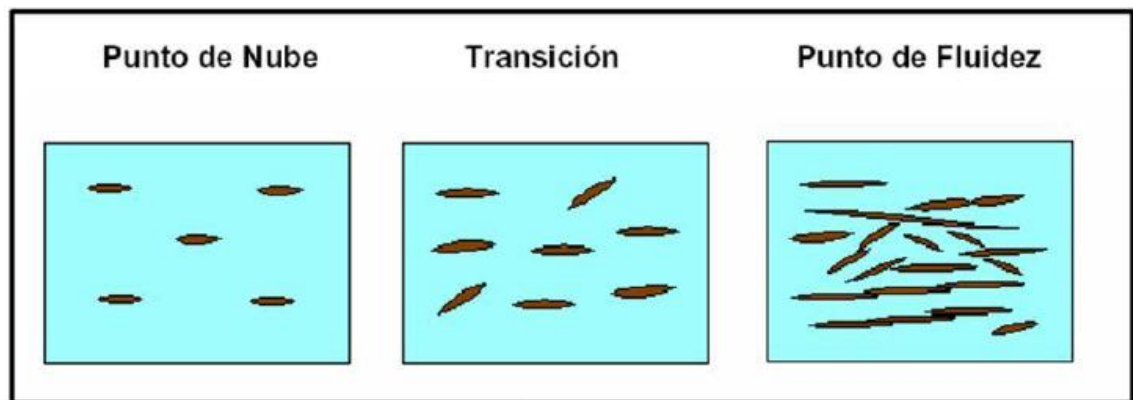
Fuente: [6]

En la figura 9 se presenta el proceso que siguen las moléculas de parafina a medida que su temperatura disminuye. Cuando la temperatura es mayor al punto nube, la cera permanece suspendida en el aceite sin precipitarse, una vez que el primer

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

crystal se forma se alcanza el punto de nube y empieza la precipitación de parafina formándose más cristales de cera a medida que la temperatura cae.

Figura 9. Proceso de formación de cristales de parafinas



Fuente: [7]

- **Punto nube.** Es la temperatura a la cual comienzan a aparecer los primeros cristales de parafina. El crudo que proviene del yacimiento en el proceso de determinación de este punto se llama crudo vivo manteniendo todas las características del reservorio en cuanto a presión y temperatura. Este punto se llama también: punto de cristalización [8].
- **Punto de fluides.** Es la temperatura más baja a la que puede fluir un crudo bajo condiciones específicas. Éste punto puede determinar el desempeño que tienen

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

los derivados del crudo bajo temperaturas bajas. El punto de fluidez del crudo resulta de la cristalización de las parafinas [8].

### 2.2.2 Métodos de prevención y eliminación de parafinas en tuberías.

- **Métodos mecánicos.** Consiste en remover la parafina mediante el uso de raspadores y cortadores de parafina. Como ventaja, este método es una alternativa relativamente económica si no se hace uso de ella frecuentemente. Aun así las complicaciones que trae este método es que la parafina raspada puede caer por el tubing saliéndose del casing ocasionando taponamientos en la formación [9].
- **Método operacional.** Este método consiste en encontrar la velocidad y el caudal óptimo con el objetivo de disminuir la precipitación de parafinas. [9]
- **Método térmico.** Se aprovecha la propiedad que tiene el calor para fundir las parafinas. Pero se debe evaluar la viabilidad del método térmico teniendo en cuenta si el precio de la cantidad de calor empleada, repercute negativamente en el precio de producción por cada barril de petróleo [9].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Entre los métodos de control de parafinas térmicos se encuentran:

- ✓ Inyección de aceite caliente.
  - ✓ Inyección de agua caliente.
  - ✓ Calentadores de fondo de pozo.
  - ✓ Calentadores eléctricos de la tubería.
- 
- **Método de tratamiento químico.** El control químico correctivo de los problemas de precipitación de parafinas en pozos de petróleo se basa en el uso de cuatro clases de productos químicos [9]:
    - ✓ Solventes.
    - ✓ Dispersantes.
    - ✓ Surfactantes.
    - ✓ Modificadores de cristal.
- 
- **Método de recubrimiento.** Consiste en utilizar tuberías con fibra de vidrio, tuberías plásticas lisas y tuberías recubiertas con químicos [9].
- 
- **Método combinado.** Consiste en aplicar dos o más métodos para corregir el problema de acumulación de parafinas, para mejorar la efectividad [9].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- **Métodos no convencionales.** Son tecnologías nuevas para controlar la deposición de parafinas, se conocen como métodos no convencionales, siendo los más importantes los siguientes [9]:

- ✓ Magnético.
- ✓ Microbial.
- ✓ Mecánico (Coiled tubing).
- ✓ Ultrasónico.

### **3. ESTADO DEL ARTE**

En este capítulo se presenta datos históricos de equipos y técnicas de calentamiento electromagnético empleadas en mejorar la movilidad del crudo para su extracción. También se muestran los resultados de algunas pruebas de calentamiento eléctrico realizadas a lo largo del tiempo en diversas partes del mundo. Además se hace una clasificación del calentamiento electromagnético dependiendo de la frecuencia eléctrica que utilice el equipo o técnica.

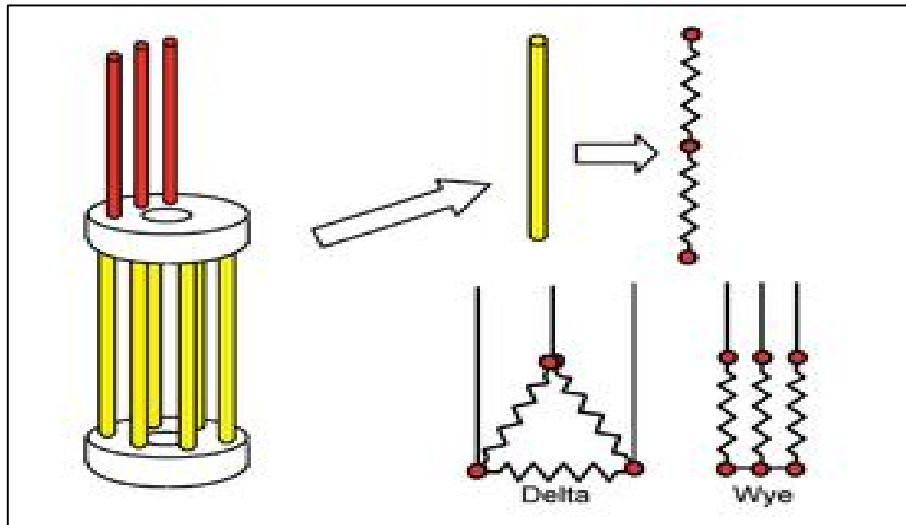
Adicionalmente se presentan algunos equipos y técnicas empleadas en el calentamiento electromagnético, y se muestran sus partes principales y principio de funcionamiento.

#### **3.1 REPASO CRONOLÓGICO: HISTORIA**

Los calentadores de fondo de pozo se han utilizado durante muchos años. Las primeras aplicaciones datan desde antes 1969 en la ex URSS y los Estados Unidos, cuya estructura se muestra en la figura 10. Estas aplicaciones tuvieron bastante éxito, lo que atrajo la atención de investigadores e ingenieros que dieron como resultados nuevas pruebas de campo.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 10. Estructura de calentadores de pozos verticales trifásicos



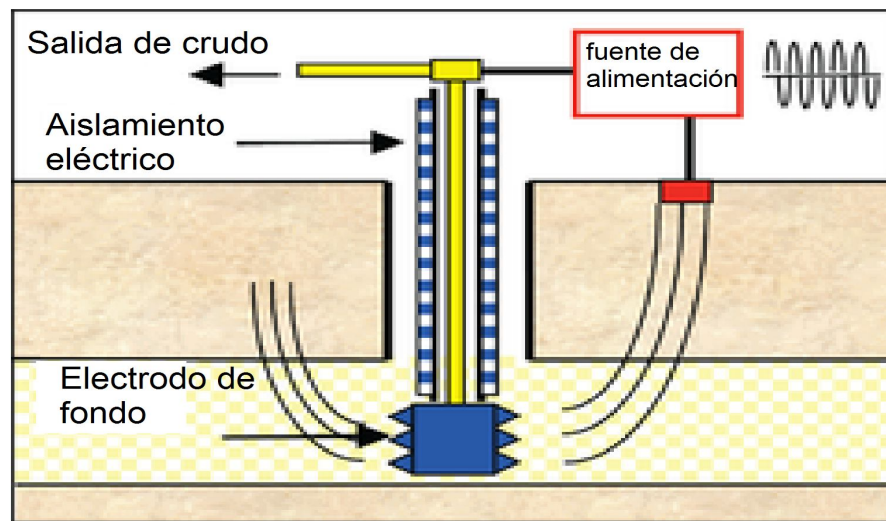
Fuente: [10].

En 1976, Abernethy fue el primero en describir el calentamiento por microondas distribuidas.

En la década del 70 se empezó a estudiar el comportamiento del crudo con el uso de las ondas electromagnéticas para calentarlo, fue así que en 1979, Gill aplicó un sistema de calefacción distribuida de baja frecuencia a los campos petroleros en Texas, Utah y México, cuya estructura se muestra en la figura 11. [3]

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 11. Inyección de corriente a través del tubing

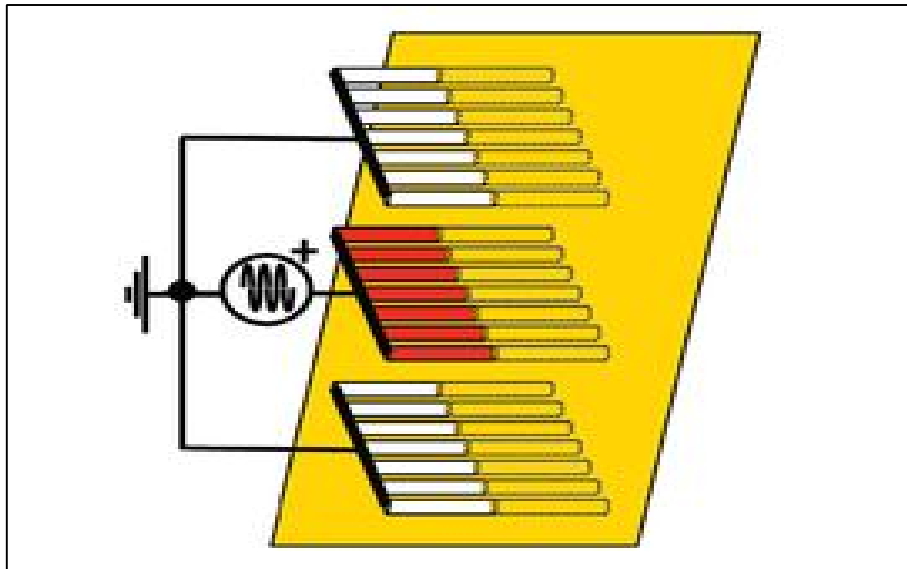


Fuente: [10].

En 1979 Puentes escribió un documento sobre el posible uso de la radio frecuencia (10 kHz a 10 MHz) para el calentamiento de alquitrán, aplicado a través de un conjunto de electrodos metálicos insertados en el embalse de superficie muy similar a un conjunto de condensadores como lo indica la figura 12.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 12. Esquema de calentamiento de alta frecuencia concentrado



Fuente: [10]

En 1983 la compañía UETECH con varios operadores condujo numerosos proyectos en sistemas de calentamiento eléctrico, lo que le permitió desarrollar nuevos equipos y técnicas para la aplicación de dicho método.

En año de 1987 se realizó una prueba piloto en el campo Rio Panon en Brasil por la compañía Petrobras. En la cual se conectó un pozo eléctricamente, y sus parámetros fueron monitoreados. Los resultados mostraron un incremento en la temperatura en la zona de interés y un aumento en la producción [11].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

### **3.2 RESULTADOS DE PRUEBAS UTILIZANDO CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO**

En la tabla 3 se presentan datos históricos de pruebas de calentamiento electromagnético realizadas por diferentes empresas e investigadores en diferentes campos petroleros. De la tabla 3 se puede apreciar que los resultados de varias pruebas fueron satisfactorios, aumentando la producción de petróleo.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 3. Pruebas de calentamiento electromagnético

No.	Fecha	Operador	Sitio de la prueba	Descripción del proyecto	Resultados
1	1985	Uentech Corporation	Ardmore, Oklahoma	Crudo muy viscoso con gravedad API 6 = 15. Se perforaron varios pozos de observación de temperatura dentro de 4 a 15 pies (1,22 a 4,57 m) del pozo de prueba. El electrodo se energizó con una Unidad de potencia de 50 Kw.	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 180 días
2	1988	Mazzei	Frog Lake 11D-15-56-3 W4M	Calentamiento resistivo de baja frecuencia usando 30 KW promedio	Incremento en la producción de 2-3 veces
3	1989	CNW	Northminster A8-6-51-27-W3M	Calentamiento resistivo de baja frecuencia usando 40 KW promedio	Relación de estimulación de 1.27
4	1989	NAM-Holland	Schoonebeck 280	Calentamiento resistivo de baja frecuencia usando 60 KW promedio	Incremento en la producción desde 82 hasta 195 bb/día (31 m <sup>3</sup> /d)
5	91-88	CNW-Canadá	Lashburn A1-11-48-25-W3M	Mezcla de calentamiento resistivo y calentamiento por tubing. Potencia: 30-50 KW	El calentamiento del yacimiento dio una relación pico de estimulación de 3.75 mientras el calentamiento del tubing produjo sólo un incremento marginal
6	91-98	Petrobras	Rio-Panon Field	Calentamiento multipozo del yacimiento. Potencia: 100-140 KW	Se reportó una duplicación de la producción promedio.
7	1997	CNRL-Canadá	St. Paul, Alberta	Calentamiento inductivo Potencia: 10 KW	Incremento de producción de 1.5 veces
8	1998-now	Renaissance	Campo Jenner, Alberta	Calentamiento inductivo Potencia promedio: 30 KW	Disminución marginal 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 marginal
11	1998-2001	Bahrain Petroleum Company	Bahrain Oilfield	Calentamiento inductivo. Potencia: 5-8 KW	Se triplicó la producción

Fuente: [11].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

### **3.3 MÉTODOS DE CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO: CLASIFICACIÓN**

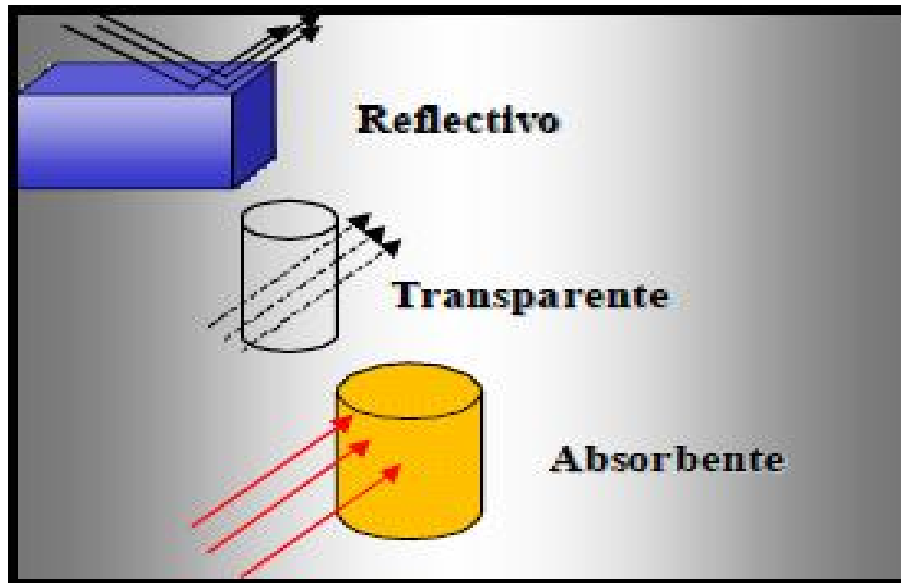
Los métodos de calentamiento electromagnéticos se clasifican de acuerdo con el valor de la frecuencia eléctrica que maneja el equipo o dispositivo, de esta manera se pueden dividir en [3]:

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

**3.3.1 Calentamiento a alta frecuencia.** El calentamiento a alta frecuencia se divide en radiofrecuencia (10-100 MHz) y microondas (300 MHz-300 GHz). Su funcionamiento consiste en variar la dirección del campo eléctrico que atraviesa un material (crudo, tubing) de manera que los dipolos de las moléculas cambien de dirección rápidamente y se produzca fricción, generación de calor y aumento de la temperatura. Este método depende principalmente del valor de la frecuencia, de la intensidad del campo eléctrico y la permisividad del medio. Una propiedad importante de los materiales que se debe tener en cuenta en este tipo de calentamiento es la constante dieléctrica o permitividad, la cual indica que cantidad de radiación puede ser reflejada, transmitida o absorbida por el material (ver figura 13). [12]

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 13. Comportamiento de diferentes materiales con distinto valor de permitividad



Fuente: [12].

**3.3.2 Calentamiento inductivo.** Su funcionamiento se basa en utilizar las corrientes de Eddy e histéresis generadas en el acero para producir calor. Generalmente este método se emplea para calentar el tubing y casing. EL sistema consta de un inductor ubicado alrededor del tubing que al pasar corriente por este genera un campo magnético dentro y fuera de la bobina y la vez se genera una fuerza electromotriz en el interior del tubing. [3]

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**3.3.3 Calentamiento eléctrico resistivo.** El calentamiento eléctrico resistivo consiste en utilizar el efecto Joule para generar calor. Éste se basa en la transformación de la energía cinética de los electrones en calor debido a los choques que sufren los átomos del material por donde circulan. Donde la potencia disipada en el material viene dada por el cuadrado de la corriente eléctrica multiplicado por la resistencia eléctrica de éste ( $i^2 * R$ ).

Las técnicas y equipos empleados en el calentamiento eléctrico resistivo se pueden clasificar en [13]:

- Inyección de corriente eléctrica a través del yacimiento, en la vecindad del pozo y de esta forma convertirlo en un elemento conductor.
- Herramientas que generen calor al paso de la corriente eléctrica elevando la temperatura del mismo y transfiriéndolo al fluido producido por el yacimiento y que está en contacto con este elemento o en zonas cercanas.

### **3.4 EQUIPOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS EN EL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO**

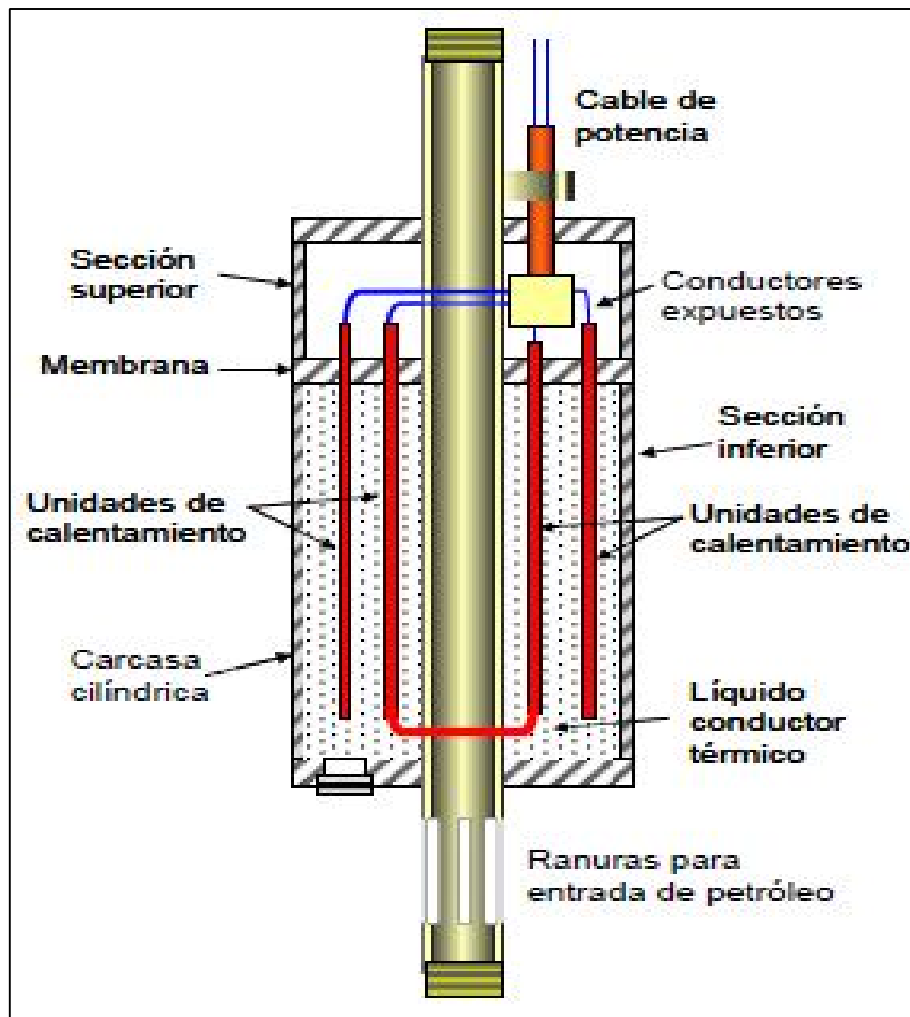
A continuación se presentan diferentes técnicas y métodos que se utilizan actualmente y se han empleado en el calentamiento electromagnético así como algunas aplicaciones comerciales:

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**3.4.1 Dispositivo de calentamiento patentado por Stegemeier.** En abril de 1960 Stegemeier presenta, la patente número 2932352 de la oficina de patentes de los Estados Unidos. El sistema consiste en un conductor que en la parte inferior está provisto de unas ranuras por el cual asciende el crudo para ser bombeado. 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 “U” que se posicionan simétricamente alrededor del tubing. Las unidades consisten en un conductor eléctrico recubierto por una capa de óxido de magnesio u otro mineral aislante el cual a su vez está cubierto por una capa metálica. Ver figura 14 [3].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 14. Dispositivo de calentamiento patentado por Stegemeier



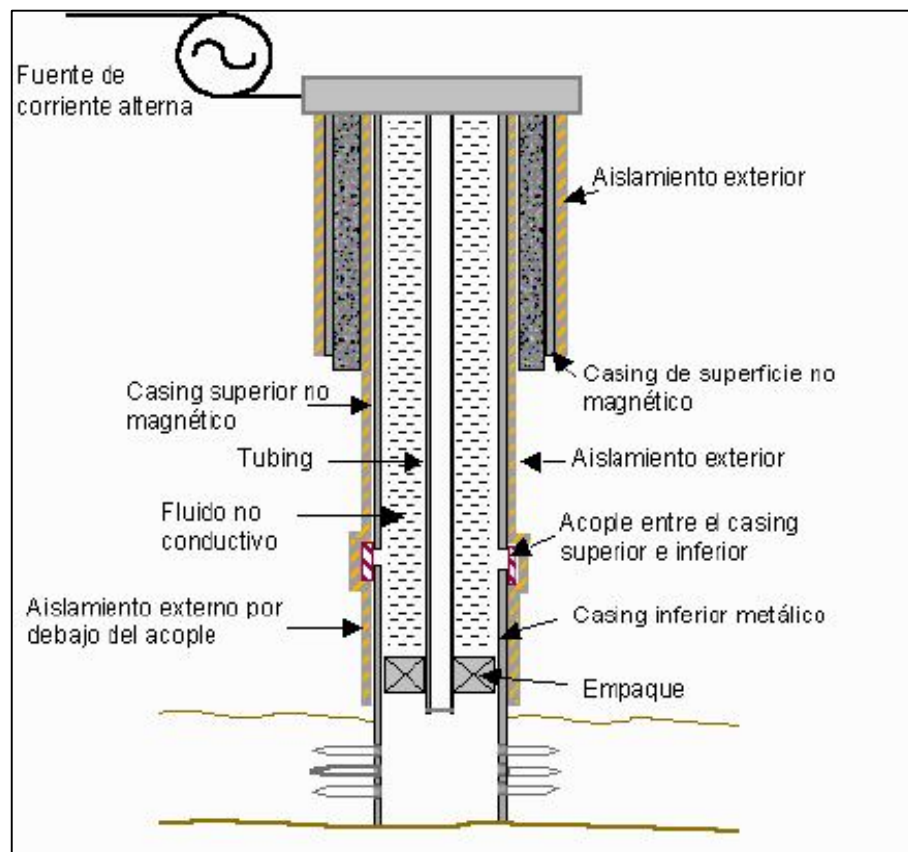
Fuente: [3].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**3.4.2 Sistemas de calentamiento por casing.** El funcionamiento del sistema de la figura 15 consiste en utilizar el casing como medio para transferir calor hacia la parte de la formación que se desea aumentar la temperatura que generalmente es la parte inferior del casing, ya que ahí es donde se encuentran las perforaciones que permiten la entrada de petróleo.

Por lo tanto el casing debe estar aislado en la mayoría de su longitud por un material no conductivo. También se necesita una fuente de corriente alterna que se conecta a la cabeza del pozo y ésta al casing. [14]

Figura 15. Sistema de calentamiento por casing



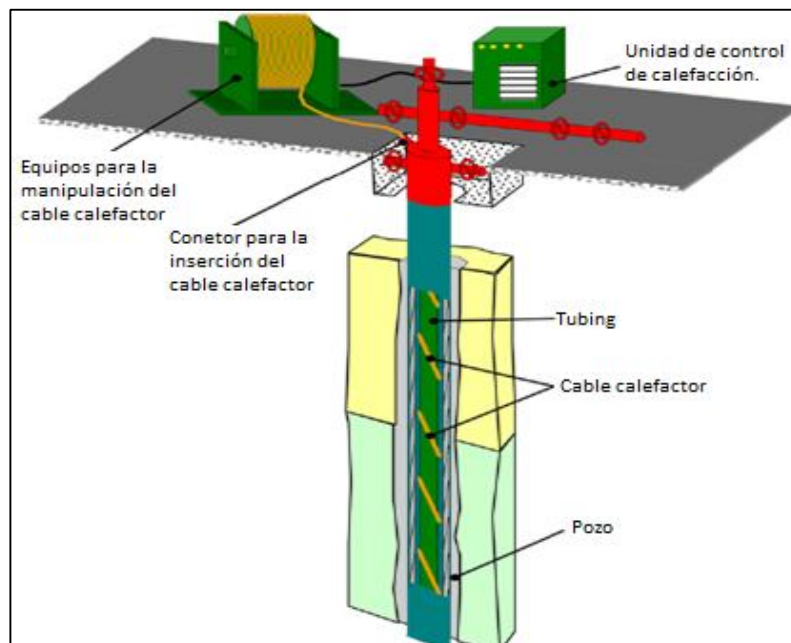
Fuente: [14].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**3.4.3 Calentamiento del crudo en ascenso por la tubería, utilizando cable de calefacción eléctrica.** En la figura 16 se muestra el esquema del dispositivo que consiste en un equipo de superficie de inyección de corriente y la unidad de control que dosifica la cantidad de calor entregada, de manera que exista un uso eficiente de la energía. El equipo de subsuelo incluye el cable de calefacción que se instala alrededor del tubing.

El método se aplica a la producción de crudo pesado, parafinico e instalado para casi todos los sistemas de bombeo (pozos que fluyen, bombas de carretera de bombeo, bombas sumergibles eléctricas, elevación de gas).

Figura 16. Esquema de dispositivo que utiliza un cable calefactor que envuelve el tubing



Fuente: [15]

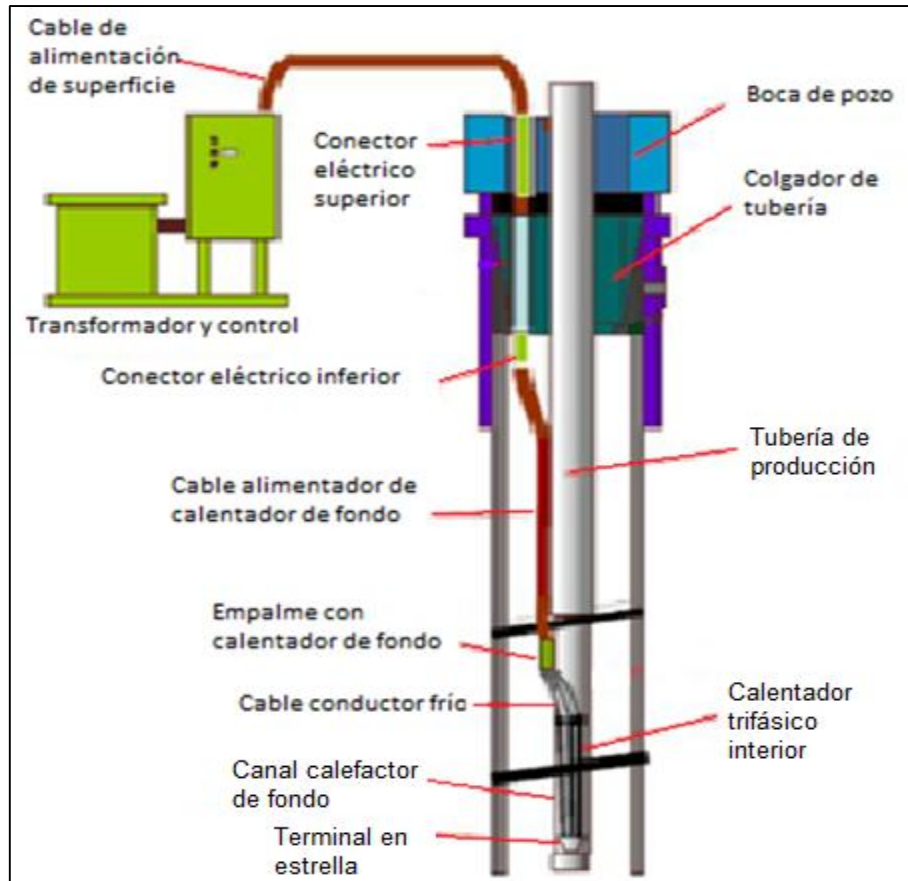
Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**3.4.4 Calentadores eléctricos de fondo de pozo.** El sistema de calefacción eléctrica de fondo de pozo consta de los siguientes componentes. Ver figura 17:

- Equipo de superficie: Panel de control y transformador.
- Cable de bomba electrosumergible: Encargado de transportar la energía al cable calefactor acoplado al tubing.
- Conector eléctrico que consta de dos partes: Empalme de fondo de pozo que realiza la conexión entre el cable electrosumergible y el cable calefactor así como el empalme de cabeza de pozo que realiza la conexión del cable electrosumergible y la superficie.
- Sistema de sujeción: Permite conectar el calentador al tubing.
- Cable calefactor: Encargado de transformar la energía eléctrica en calor y transferirla al tubing.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 17. Esquema de un dispositivo que utiliza un cable calefactor ubicado en el fondo del pozo

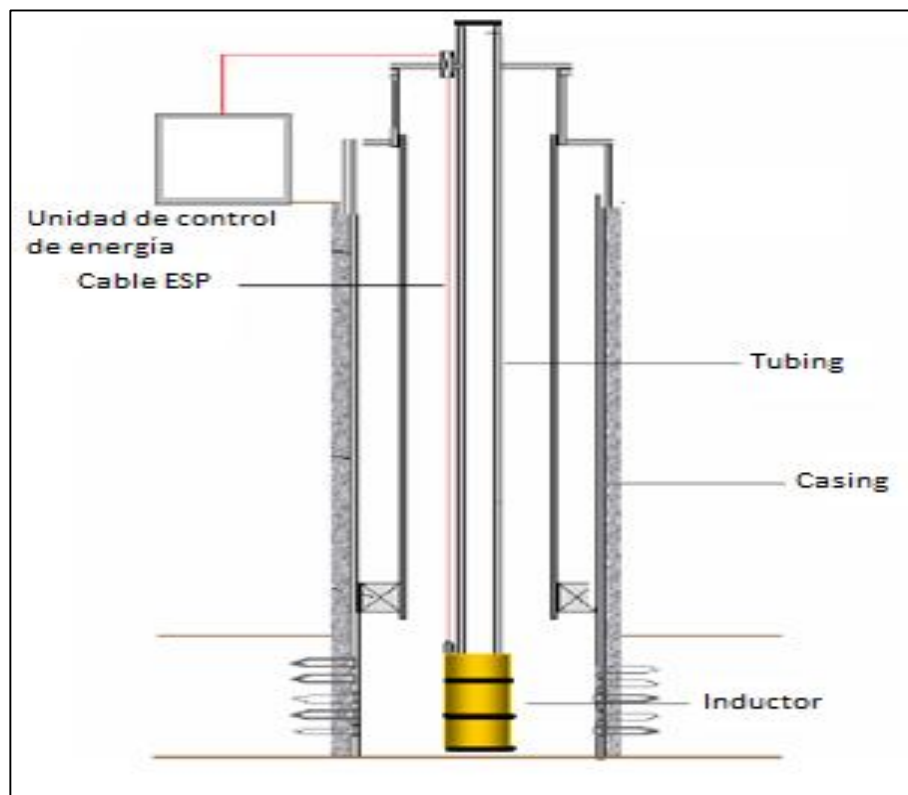


Fuente: [16].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**3.4.5 Sistema de calentamiento por inducción.** El sistema que se muestra en la figura 18 se utiliza para calentar la formación mediante la inducción de calor al casing. El sistema se compone de una fuente de alta tensión en la superficie, un transformador y una unidad de acondicionamiento de energía, un controlador de corriente, sistemas de lecturas de presión y temperatura. Su funcionamiento consiste en generar un campo magnético variable con el tiempo que induce corrientes eléctricas en el casing que generan un calentamiento que se transmite a la formación. De esta manera se mejora la productividad de aceite ya que se disminuye la viscosidad del mismo.

Figura 18. Sistema de calentamiento por inducción

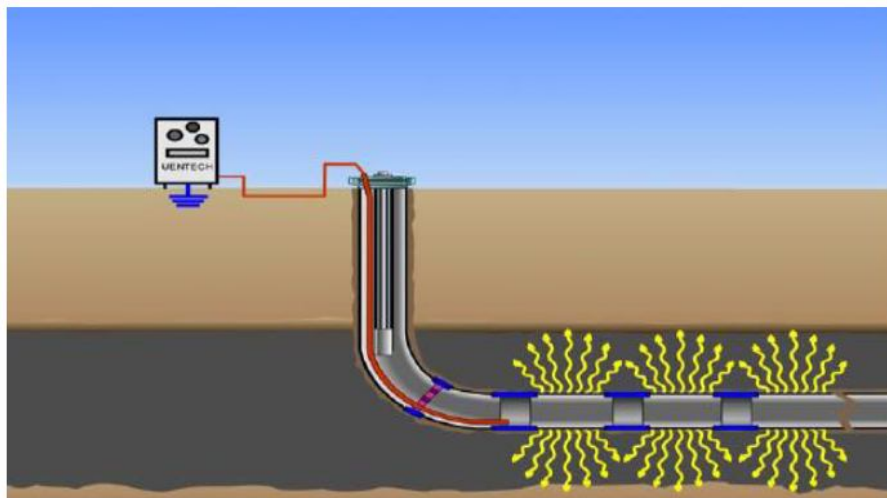


Fuente: [14].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**3.4.6 Calentamiento eléctrico en pozos horizontales<sup>7</sup>.** Se utiliza un sistema de calentadores ubicados en el casing con la finalidad de aumentar la temperatura de la formación, disminuir la viscosidad y mejorar la movilidad tal como se evidencia en la figura 19.

Figura 19. Sistema de calentamiento en pozos horizontales



Fuente: [13]

**3.4.7 Aplicaciones Comerciales.** A continuación se muestran algunas aplicaciones de calentamiento eléctrico, comercializadas por empresas dedicadas a la fabricación de herramientas térmicas.

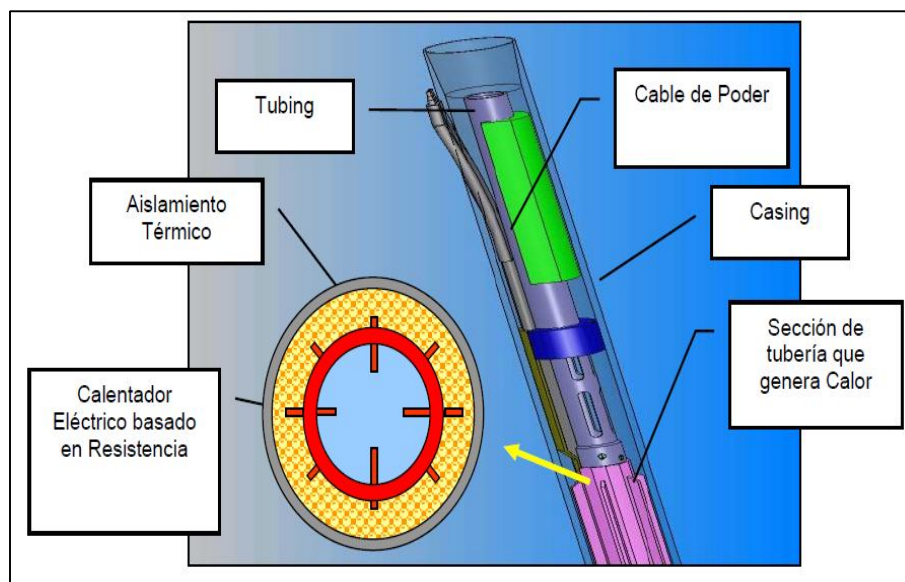
---

<sup>7</sup> Pozos perforados paralelos a los planos de estratificación de un yacimiento con el fin de garantizar una mayor área de producción. Éstos tienen una inclinación no menor a 86° respecto a la vertical del terreno.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**3.4.7.1 Sistema de calentamiento en fondo de pozo desarrollado por Lynbrook Heating Technologies.** La empresa Lynbrook System de Houston Texas, desarrollo un dispositivo especializado para realizar calentamiento en la tubería del pozo. La potencia que maneja este calentador es de 35 kW hasta 75 kW para el tubing de 5-1/2" y el casing maneja una potencia de 120 kW para el tubing de 7", contiene una sección de tubería con núcleo resistivo de alta disipación térmica acompañados de unas aletas de material metálico de alta conductividad térmica hacia el interior, el cual va conectado a un cable de potencia que provee la corriente necesaria para que sea efectivo el calentamiento, como se muestra en la figura 20. Una característica importante de este dispositivo es que permite realizar el calentamiento más focalizado, es decir en la sección de la tubería donde se empieza a depositar parafinas en la tubería [3].

Figura 20. Sistema de calentamiento en fondo de pozo desarrollado por Lynbrook Heating Technologies

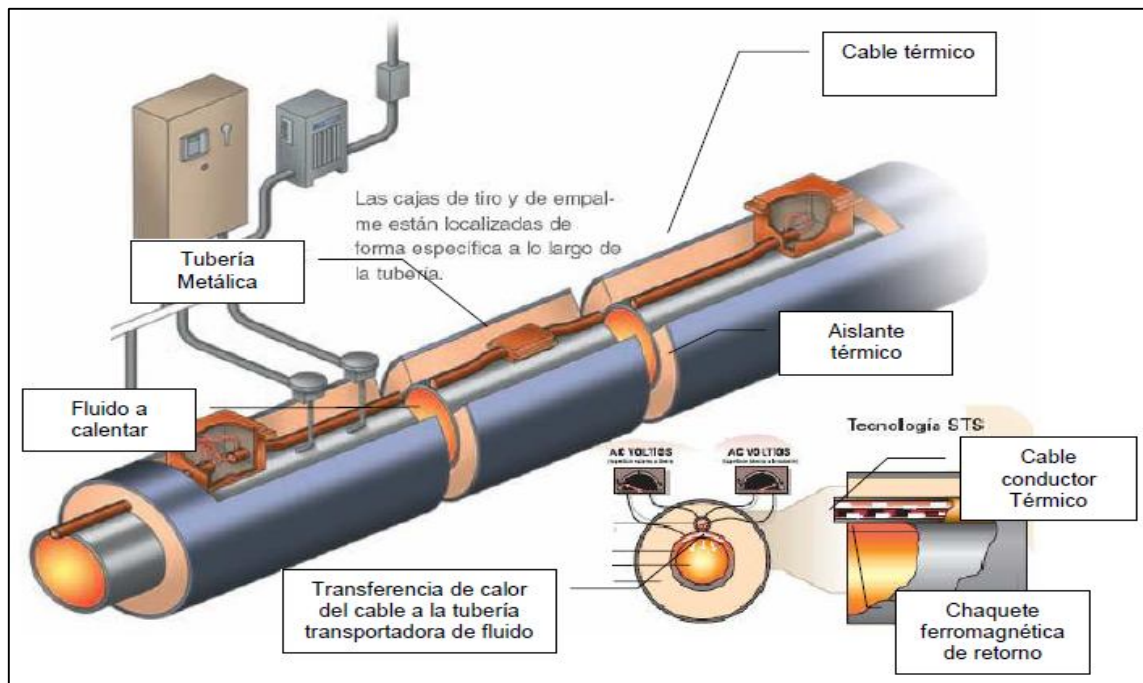


Fuente:[3].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**3.4.7.2 El “Tracer STS Skin-efecct: Sistema de Traceado Eléctrico” de la empresa Tyco Thermal Controls.** El Tracer STS, es un sistema que genera el calor efectivo para tuberías de media y larga longitud, en la figura 21 se aprecian las configuraciones del sistema. Esta herramienta tiene diversas aplicaciones entre las que se encuentran: Líneas de transferencia de productos, fundición de nieve e hielo. Además puede trabajar a una potencia nominal de hasta 150 W/m, alcanza la temperatura de mantenimiento de hasta 200°C, temperatura de exposición de hasta 250°C.

Figura 21. Sistema de traceado eléctrico de la empresa Tyco Thermal Controls



Fuente: [3].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

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 a la tubería. El sistema STS es eléctricamente seguro, produce calor en la tubería ferromagnética gracias al efecto de dos fenómenos eléctricos muy conocidos: Skin Effect (efecto 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 aislante térmico, el calor generado finalmente se transmite eficientemente a la tubería de proceso [3].

## **4. MODELADO DE LA TEMPERATURA DEL CRUDO**

### **4.1 POZO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CALENTAMIENTO PROPUESTO**

El desarrollo del presente proyecto está basado en las características físicas, químicas y climáticas del pozo C25<sup>8</sup> del Campo Escuela Colorado<sup>9</sup>. Es decir, la aplicación del método de calentamiento propuesto (hornilla) espera obtener resultados para el pozo en mención. Es posible aplicarlo en otros pozos, teniendo en cuenta las condiciones de los mismos y haciendo el análisis respectivo.

El Campo Escuela Colorado se encuentra ubicado en la cuenca del Valle del Magdalena Medio en la vereda Los Colorados, corregimiento de Yarima, en el municipio de San Vicente de Chucurí, departamento de Santander al sudeste de la ciudad de Barrancabermeja [17]. Tal como se muestra en la figura 22, en donde el triángulo rojo indica el sector del Municipio de San Vicente de Chucurí y la demarcación en verde encerrado por un círculo rojo es en donde se halla el Campo Escuela Colorado. La tabla 4 muestra datos básicos en cuanto a la georreferenciación del pozo C25 y su histórico de perforación. En la figura 23 se muestra la apariencia del cabezal del pozo, así como la vía de acceso al mismo.

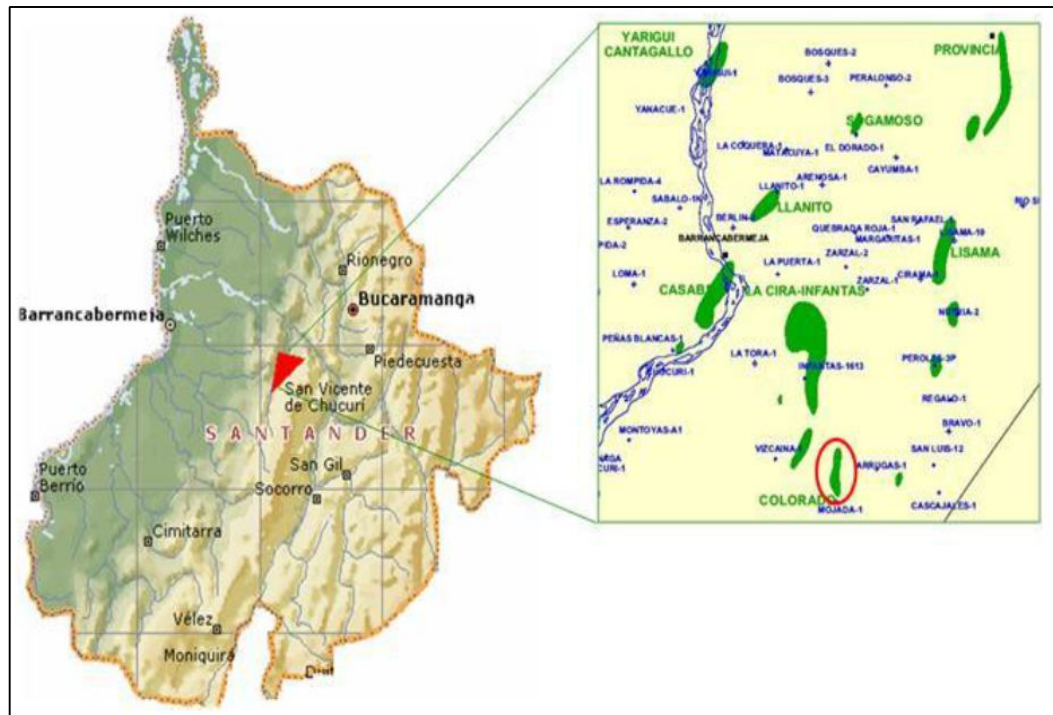
---

<sup>8</sup> Pozo del Campo Escuela Colorado al que se encuentra orientada esta investigación.

<sup>9</sup> Campo petrolero cuya administración y explotación es realizada por parte de la Universidad Industrial de Santander bajo convenio interadministrativo realizado entre esta universidad y la compañía estatal petrolera ECOPETROL S.A.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 22. Ubicación del Campo Escuela Colorado



Fuente: Banco de Imágenes del Campo Escuela Colorado.

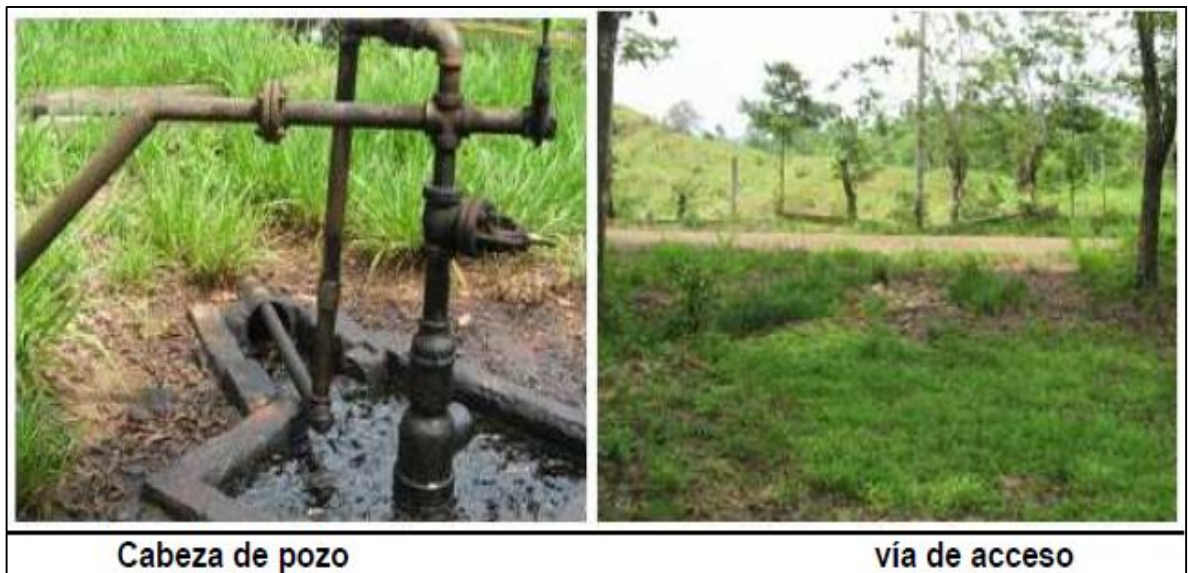
Tabla 4. Datos básicos C25

<b>Localización</b>	<b>N 1°240.767,63 E 1°039.412,06</b>
Elevación del terreno	395 pies
Inicio de perforación	18/Ene/1954
Completado	12/Abr/1954
Elevación rotaría	405,2'
Profundidad total	2520'
Taponado a	2245'

Fuente: Base de datos de Campo Escuela Colorado.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 23. Cabeza del pozo C25 y vía de acceso al sitio



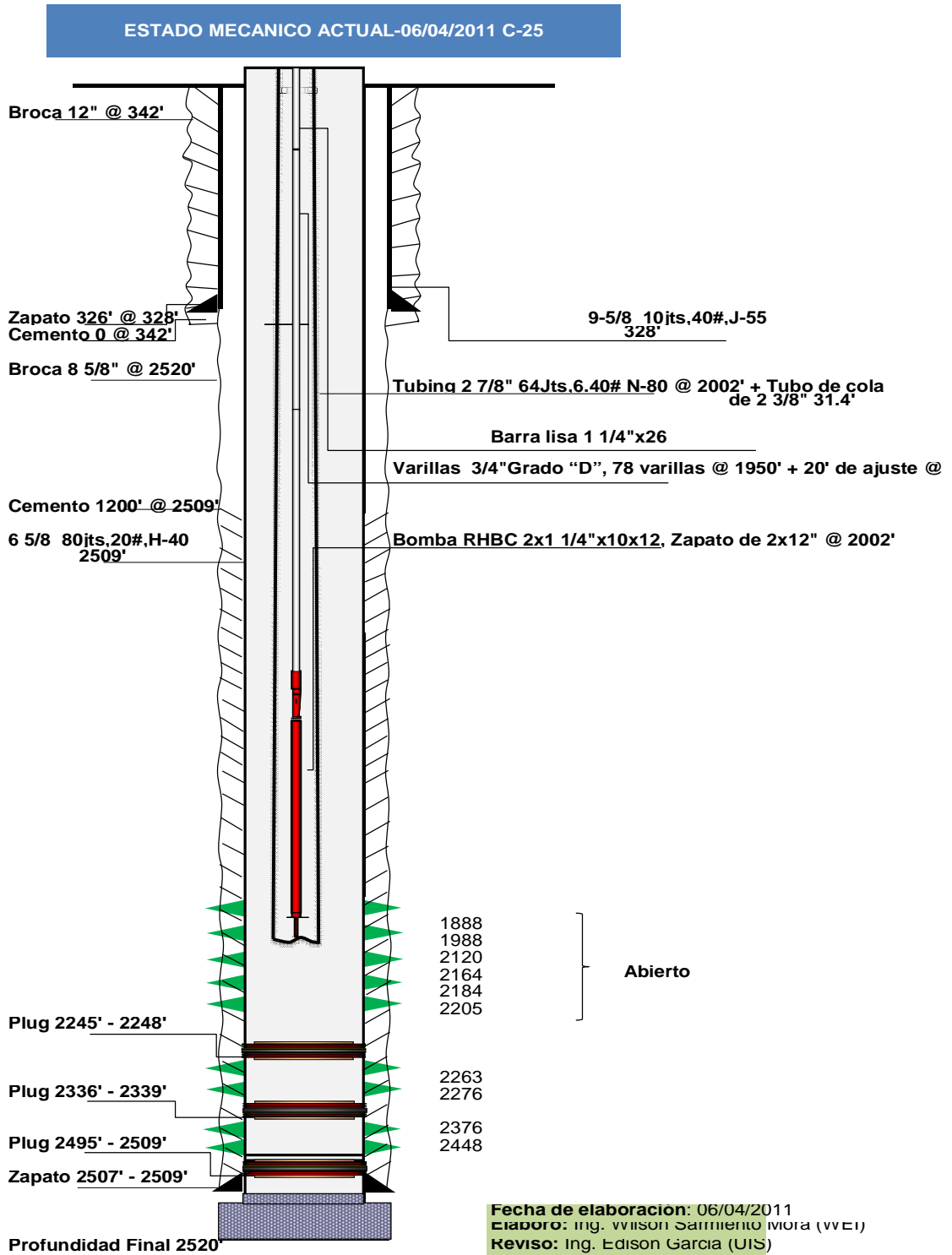
Fuente: Banco de imágenes del Campo Escuela Colorado.

#### 4.2 ESTADO MECÁNICO ACTUAL DEL POZO C25

El pozo C25 del Campo Escuela Colorado se encuentra constituido mecánicamente como se muestra en la figura 24. Para éste, se resume en la tabla 5 las características físicas y termodinámicas de la parte mecánica del pozo y del crudo. A su vez, estas se tienen en cuenta en el desarrollo de la herramienta de calentamiento que se analiza en el presente proyecto.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 24. Estado mecánico actual pozo C25



Fuente: Base de datos de Campo Escuela Colorado

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 5. Características térmicas y mecánicas del pozo C25

<b>CARACTERÍSTICAS DEL POZO C-25 DE CAMPO ESCUELA COLORADO</b>	
Longitud del tubing	610,21 m
Diámetro interno del tubing	0,055 m
Diámetro externo del tubing	0,073 m
Diámetro interno del casing	0,1534 m
Diámetro externo del tubing	0,1683 m
Ancho del espacio anular	0,0402 m
Temperatura ambiente	26 °C
Temperatura de fondo de pozo	40 °C
Temperatura en la parte inferior del tubing	37,77 °C
Calor específico del tubing y casing	460 J/Kg*K
Conductividad térmica del tubing y casing	50 w/m*K
Densidad del tubing y casing	7850 Kg/m <sup>3</sup>
Calor específico de la formación	1839,2 J/Kg*K
Conductividad térmica de la formación	2,42 w/m*K
Densidad de la formación	900 Kg/m <sup>3</sup>
Conductividad térmica del cemento	0,346 W/m*K
Calor específico del crudo	2000 J/Kg*K
Conductividad térmica del crudo	0,17 W/m*K
Densidad del crudo	780 Kg/m <sup>3</sup>
Velocidad promedio del fluido en ascenso	0,0077 m/s
Producción de petróleo (al 24 de Noviembre del 2010)	10 Bls
Temperatura de cristalización del crudo.	32,2 °C

Fuente: Base de datos de Campo Escuela Colorado.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

#### **4.3 PERFIL<sup>10</sup> DE TEMPERATURA DEL CRUDO EN C25**

De acuerdo con estudios realizados en [5], se tiene la tabla 6 que muestra la variación de la temperatura del crudo respecto a la profundidad del pozo. Se puede observar que se presenta cristalización de parafinas a lo largo de la tubería de extracción debido a que la temperatura del crudo en ésta es inferior a la de cristalización o nube. Este fenómeno (cristalización de parafinas) se hace lento cuando el pozo está activo, debido al desplazamiento del crudo por acción del bombeo mecánico que tiene C25. Pero cuando por algún motivo el proceso de extracción es frenado, el enfriamiento del crudo<sup>11</sup> propicia una formación y precipitación en cadena de las parafinas existentes en éste, taponando el tubing.

---

<sup>10</sup> Se asume que en cada sección transversal a lo largo del tubing se ha alcanzado un equilibrio térmico, por lo que la temperatura se puede obtener como la temperatura del crudo registrada en cualquier punto dentro de la tubería a esa profundidad.

<sup>11</sup> Disminución de temperatura provocada por la pérdida de energía cinética en el crudo.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 6. Variación del punto de cristalización de parafina

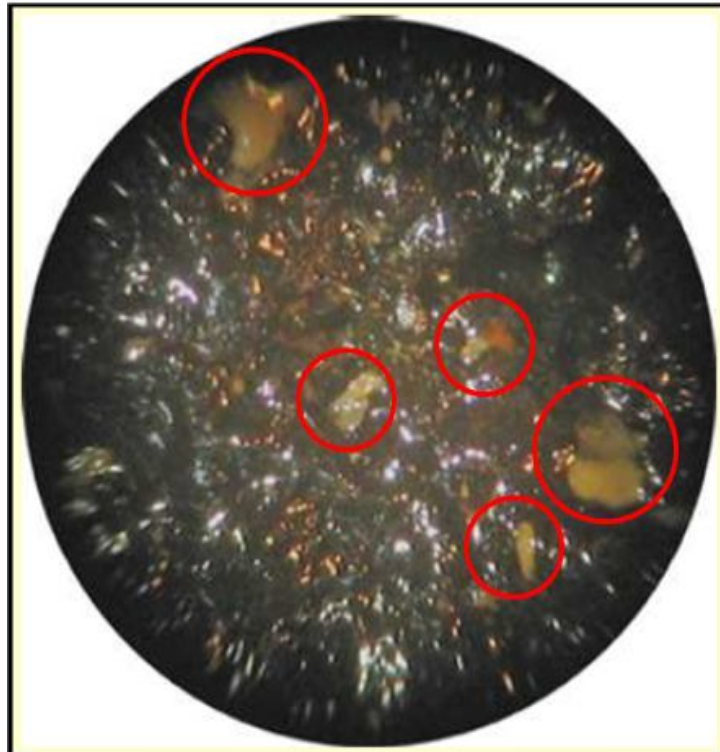
Profundidad (pies)	Presión (psia)	Temperatura del fluido (°F)	Temperatura de cristalización (°F)
0	14,49	84,32	
86	15,09	84,81	90
140	15,11	84,81	
234	22,76	85,12	
350	49,54	85,12	
483	79,63	85,12	
617	118,87	85,12	
770	163,69	85,20	
918	210,94	85,30	
1077	260,51	85,40	
1237	314,79	85,50	
1394	369,23	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	
<b>2185</b>	<b>805,00</b>	<b>104,00</b>	
			130

Fuente: [5].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- **Muestra de crudo: Formación de parafina.** En la figura 25 se aprecia una muestra de crudo del pozo C25 a 2191 pies de profundidad. En esta se puede observar en color amarillo y resaltado en color rojo la formación de cristales de parafina.

Figura 25. Muestra de crudo tomada del pozo C25



Fuente: [5].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

#### 4.4 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL POZO

El crudo en su transporte por el tubing hasta la superficie desde el fondo de pozo, disminuye su temperatura debido a la transferencia de calor que existe entre el crudo y la formación.

La transferencia de calor, siempre se produce del cuerpo que tiene temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y esta transferencia se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura [18].

En la elaboración del modelo se debe tener en cuenta los diferentes mecanismos de transferencia de calor que existen los cuales son: conducción, convección y radiación.

**4.4.1 Conducción.** La conducción de calor es un mecanismo de transferencia de calor a escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de una molécula con otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde la temperatura más alta a la más baja. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases [19].

La razón de conducción de calor a través de un medio depende de la geometría que éste posea, su espesor, el tipo de material y la diferencia de temperatura. En el caso de una pared plana la transferencia de calor es directamente proporcional a la diferencia de temperatura en ésta, al área de transferencia de calor, e inversamente proporcional a su espesor según la ecuación (2):

$$\text{Razón de conducción de calor} \propto \frac{(\text{Área}) * (\text{Diferencia de temperatura})}{\text{Espesor}} \quad (2)$$

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

O como se muestra en la ecuación (3):

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta_x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta_x} \text{ [W]} \quad (3)$$

En el caso límite que  $\Delta_x \rightarrow 0$ , la transferencia de calor se modela mediante la ecuación (4), la cual se llama **ley de Fourier de la conducción de calor**.

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \text{ [W]} \quad (4)$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad que tiene éste para conducir calor. Si su valor es alto, el material se considera que es un buen conductor térmico, y si su valor es bajo el material se llama aislante térmico.

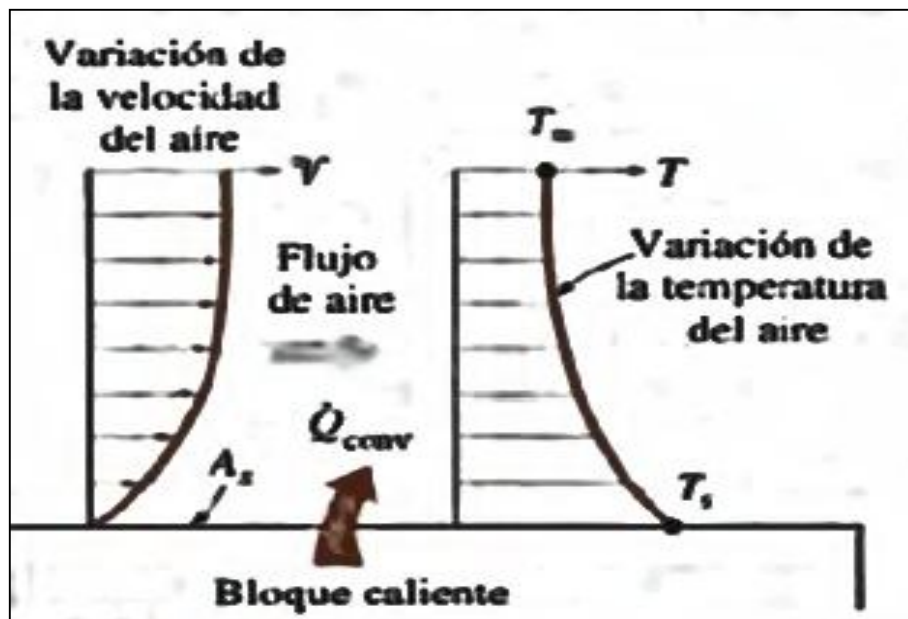
**4.4.2 Convección.** La convección es un mecanismo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacentes que están en movimiento y, comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de los fluidos. La transferencia de calor por convección se incrementa si la velocidad del fluido aumenta.

La transferencia de calor por convección se clasifica en dos formas de acuerdo con la naturaleza del flujo. Se dice que hay convección forzada cuando el flujo lo causan medios externos como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos. Por ejemplo en la figura 26 se muestra un bloque cuya área superficial ( $A_s$ ) se encuentra a una temperatura  $T_s$ , y esta se encuentra en contacto con un flujo de aire, lo cual genera una transferencia de energía desde la superficie sólida hacia la capa de aire

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

adyacente. Después, esa energía se aleja por el movimiento macroscópico del aire siendo reemplazada esta capa cálida por otra más fría [18].

Figura 26. Transferencia de calor por convección



Fuente:[18].

En el caso de la convección natural, el movimiento del fluido no lo causa algún medio externo sino, fuerzas de empuje que se inducen debido a la diferencia en el valor de la densidad, ocasionado por el cambio de temperatura en el fluido.

A pesar de la complejidad de la convección, la transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperatura y al área de contacto del sólido con el fluido. A este fenómeno se le llama “Ley de Enfriamiento de Newton” descrita en la ecuación (5):

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h * A_s * (T_s - T_{\text{amb}}) \text{ [W]} \quad (5)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$ , no es una propiedad del fluido, éste es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección como son la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de este y la velocidad máxima.

**4.4.3 Radiación.** La transferencia de calor por radiación se debe a la temperatura que poseen los cuerpos. Todo aquel que esté por encima del cero absoluto térmico emite radiación. La energía de la radiación se transporta por ondas electromagnéticas o fotones<sup>12</sup>. Dicha transferencia de energía no requiere de un medio material como es el caso de la conducción y la convección, de hecho la transferencia por radiación es más eficiente si el medio presente es el vacío. Es diferente de otras formas de radiación como los rayos x, los rayos gamma, las microondas, las ondas de radio y televisión que no están relacionadas con la temperatura [18].

La radiación es un fenómeno volumétrico, es decir, todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. En los sólidos se considera un fenómeno superficial puesto que las radiaciones que se emiten en el interior de estos cuerpos nunca llegan a la superficie. A su vez, de toda la radiación que pueda incidir sobre dicho cuerpo, se absorbe sólo unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos.

Por otra parte, en los sólidos la cantidad de energía que es emitida como depende de su temperatura absoluta y de la naturaleza de su superficie. La máxima radiación

---

<sup>12</sup> Teoría de la Dualidad: Onda/Partícula.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

que puede emitir una superficie a una temperatura  $T_s$  se expresa por la ley de Stefan-Boltzman<sup>13</sup>. Ver ecuación (6):

$$\dot{Q}_{\text{emitida,max}} = \sigma A_s T_s^4 \quad (6)$$

Tal que:

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman

$A_s$ : Área superficial.

$T_s$ : Temperatura en la superficie.

El sólido que posea dichas características recibe el nombre de radiador perfecto o de cuerpo negro el cual posee una superficie idealizada que irradia calor a una tasa proporcional de la cuarta potencia de la temperatura.

El calor generado por una superficie real es menor al generado por un cuerpo negro a la misma temperatura y está dado por la ecuación (7).

$$\dot{Q}_{\text{emitida}} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (7)$$

Donde  $\varepsilon$  es una propiedad adimensional de la superficie llamada “emisividad” y su valor oscila entre  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ . La emisividad indica la eficiencia del calor irradiado.

- **Caso puntual de estudio.**

En los pozos de extracción de petróleo, al transportar el crudo desde el fondo hasta la superficie existen pérdidas de calor con los alrededores debida a la diferencia de

---

<sup>13</sup> Teoría del cuerpo negro.

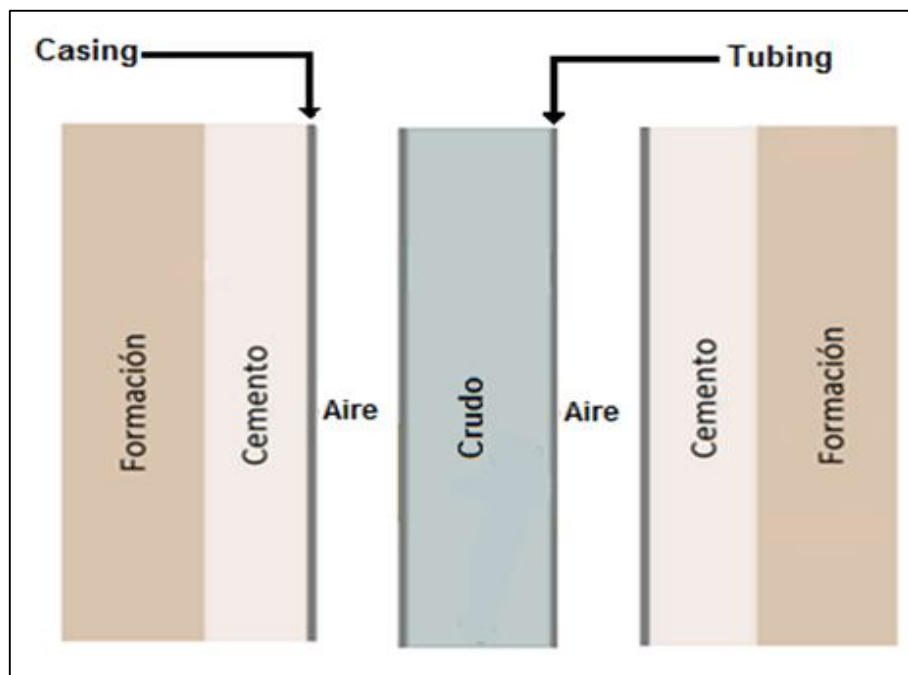
Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

temperatura que hay entre estos medios, lo que ocasiona que el crudo disminuya su temperatura, pudiendo iniciar un proceso de precipitación de parafinas si su temperatura disminuye por debajo del punto de cristalización.

#### 4.5 CONSIDERACIONES EN LA ELABORACIÓN DEL MODELO

En la elaboración del modelo de la temperatura del crudo a través del tubing se debe identificar cual(es) modo(s) de transferencia de calor está(n) presente(s) en cada medio del pozo (tubing, casing, cemento, espacio anular). Además se deben tener en cuenta las consideraciones que a continuación se enuncian. Ver figura 27.

Figura 27. Medios presentes en fondo de pozo



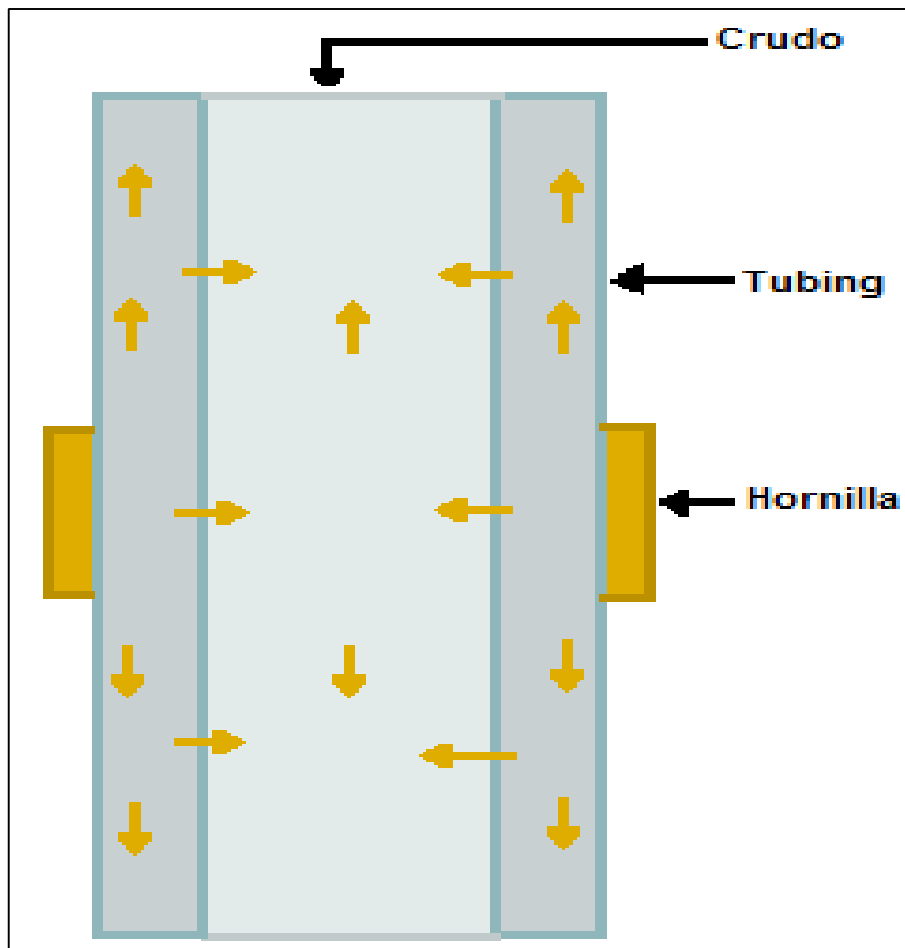
Fuente: Los autores.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- El crudo a través de la tubería se comporta como un fluido laminar, ya que éste viaja a una velocidad relativamente baja y no se ve afectado por las protuberancias e imperfecciones que posea el tubing en su interior (flujo no turbulento).
- El crudo presente se encuentra en una sola fase y no hay cambio de estado durante el calentamiento.
- La conductividad térmica del tubing, el calor específico y la densidad del crudo del pozo C25 no cambia con el aumento de la temperatura.
- La velocidad real de desplazamiento del crudo es lenta, por lo tanto se considera que éste se puede modelar como un cuerpo estático.
- La ubicación de la hornilla abarca una pequeña sección del tubing y al calentar, el calor se distribuye de forma radial y en la dirección “z” (vertical) del mismo el cual transfiere su energía al crudo, como se muestra en la figura 28.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 28. Distribución del calor transferido por la hornilla



Fuente: Los autores.

- La transferencia de calor a través del espacio anular que hay entre el tubing y casing se realiza por convección y radiación. Ésta depende de las propiedades del aire<sup>14</sup>, emisividades del tubing y casing y de la diferencia de temperatura entre la pared externa del tubing y la pared interna del casing.

<sup>14</sup> En la literatura se sugiere que en el espacio anular que existe entre el tubing y casing se considere la existencia de aire [21], [20].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**4.5.1 Modelado de la transferencia de calor para el sistema crudo-tubing-casing-cemento en estado transitorio.** Dada la geometría cilíndrica del tubo de producción, se adopta un sistema de coordenadas adecuado para obtener el modelo de temperatura propuesto. Éstas son precisamente las coordenadas cilíndricas.

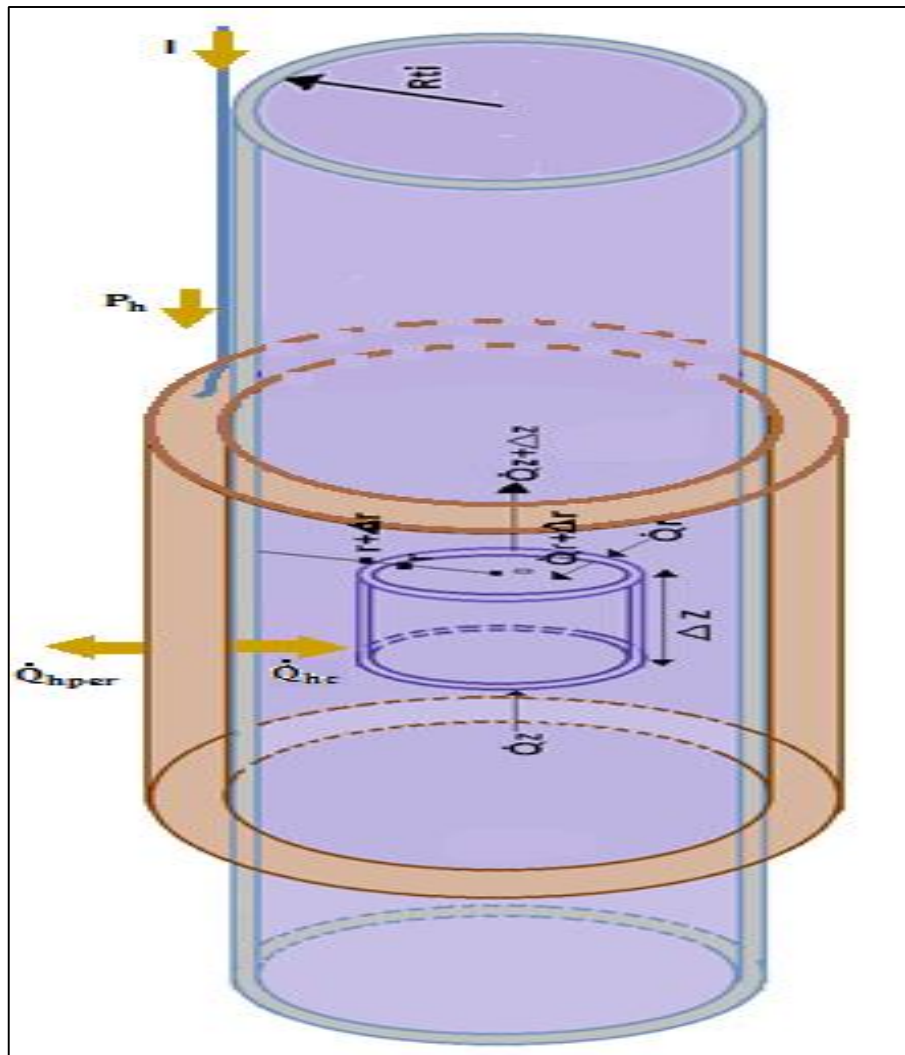
Se realiza un balance de energía sobre un elemento delgado, durante un pequeño intervalo de tiempo  $\Delta t$ , como se muestra en la figura 29. A continuación se desarrolla el modelo de transferencia de calor<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> En este balance, la transferencia de calor es en dirección radial y dirección "z" (vertical).

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 29. Balance de energía sobre un elemento infinitesimal



Fuente: Los autores.

$$\left( \begin{array}{c} \text{Razón de} \\ \text{conducción} \\ \text{de calor en } r \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Razón de} \\ \text{conducción} \\ \text{de calor en } r + \Delta r \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Razón de} \\ \text{conducción} \\ \text{en } z \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Razón de} \\ \text{conducción} \\ \text{en } z + \Delta z \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Velocidad de generación} \\ \text{de calor en el crudo} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Razón de cambio} \\ \text{de energía del} \\ \text{elemento} \end{array} \right) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_r - \dot{Q}_{r+\Delta r} + \dot{Q}_z - \dot{Q}_{z+\Delta z} + \dot{E}_{gen,crudo} = \Delta \text{Elemento} \quad (9)$$

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

En donde:

$$(\Delta \text{Elemento}) = m * C * ([T_{(t+\Delta t)} - T_t]) / \Delta t \quad (10)$$

$$m = \rho * 2\pi r \Delta_r \Delta_z \quad (11)$$

$$\dot{E}_{\text{gen,crudo}} = \dot{e}_{\text{gen}} * [2\pi r \Delta_r \Delta_z] \quad (12)$$

Siendo  $\dot{e}_{\text{gen}}$  la energía “generada” por unidad de volumen. Al reemplazar en la ecuación (9) se obtiene la ecuación (13):

$$\dot{Q}_r - \dot{Q}_{r+\Delta r} + \dot{Q}_z - \dot{Q}_{z+\Delta z} + \dot{e}_{\text{gen}} * [2\pi r \Delta_r \Delta_z] = \rho * 2\pi r \Delta_r \Delta_z * C * \frac{[T_{(t+\Delta t)} - T_t]}{\Delta t} \quad (13)$$

Se divide la ecuación (13) entre  $2\pi r \Delta_r \Delta_z$ , de donde se genera la ecuación (14):

$$-\frac{[\dot{Q}_{r+\Delta r} - \dot{Q}_r]}{2\pi r \Delta_r \Delta_z} - \frac{[\dot{Q}_{z+\Delta z} - \dot{Q}_z]}{2\pi r \Delta_r \Delta_z} + \dot{e}_{\text{gen}} = \rho * C * \frac{[T_{(t+\Delta t)} - T_t]}{\Delta t} \quad (14)$$

Luego se saca factor común de la ecuación (14) de donde resulta la ecuación (15):

$$-\frac{1}{2\pi r \Delta_z} * \left[ \frac{\dot{Q}_{r+\Delta r} - \dot{Q}_r}{\Delta_r} \right] - \frac{1}{2\pi r \Delta_r} * \left[ \frac{\dot{Q}_{z+\Delta z} - \dot{Q}_z}{\Delta_z} \right] + \dot{e}_{\text{gen}} = \rho * C * \frac{[T_{(t+\Delta t)} - T_t]}{\Delta t} \quad (15)$$

Se aplica la operación matemática límite de donde se obtiene el siguiente desarrollo:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[T_{(t+\Delta t)} - T_t]}{\Delta t} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{\dot{Q}_{r+\Delta r} - \dot{Q}_r}{\Delta_r} &= \frac{\partial \dot{Q}}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left( -K * A_r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left( -K * 2\pi r \Delta_z * \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ &= -K * 2\pi \Delta_z * \frac{\partial}{\partial r} \left( r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\dot{Q}_{z+\Delta z} - \dot{Q}_z}{\Delta z} = \frac{\partial \dot{Q}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( -K * A_z * \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( -K * 2\pi r \Delta_r * \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (18)$$

$$= -2\pi r \Delta_r * K * \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

$$\frac{K * 2\pi \Delta_z}{2\pi r \Delta_z} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \frac{2\pi r \Delta_r * K}{2\pi r \Delta_r} * \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{e}_{gen} = \rho c * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (19)$$

$$K * \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + K * \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{e}_{gen} = \rho c * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (20)$$

Finalmente se obtiene la ecuación (21):

$$\left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{K} = \frac{1}{\alpha} * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (21)$$

Ya que el tubing, casing y cemento no presentan generación interna de calor, entonces el término  $\dot{e}_{gen}=0$ , y se llega a la ecuación (22) que corresponde al modelo de la transferencia de calor variable en el tiempo, para cualquier medio tangible del pozo.

$$\left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (22)$$

En donde:

$\alpha$ : Difusividad térmica del material [ $m^2/s$ ].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

El modelo matemático descrito por la ecuación (22) corresponde al estado transitorio del calentamiento del crudo. Este mismo modelo es válido para describir la transferencia de calor que se presenta en el tubing, casing y el cemento que recubre la formación.

**4.5.2 Transferencia de calor en el anular.** Se considera que en el espacio anular que existe entre el tubing y casing se encuentra aire y la transferencia de calor se realiza desde la pared externa del tubing, hacia la pared interna del casing por los mecanismos de radiación y convección, siendo éste último el mecanismo que más aporta a las pérdidas de calor en el crudo.

En este proceso de transferencia de calor se debe definir el coeficiente de convección que depende de las temperaturas del tubing y casing.

- **Coficiente de convección  $h_c$ .** Este coeficiente para el espacio anular es propuesto por Dropkin y Sommerscalez. Éste se expresa según lo indicado en la ecuación (23), que depende de las propiedades del aire [20]. Este coeficiente se utiliza en un análisis de estado estable y transitorio.

$$h_c = 0,1 * \left(\frac{d_{ci}}{d_{to}}\right)^{0,15} * \left(\frac{\rho_a^2 * \beta_a * g * (T_{to} - T_{ci})}{\mu_a^2}\right)^{0,3} * K_a * d_{to}^{-0,1} * (Pr)^{0,3} \quad (23)$$

$$Pr = \frac{C_p * \mu_a}{K_a} \quad (24)$$

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Pr: Número de Prandtl<sup>16</sup>.

Dónde las propiedades térmicas del aire dependen de la temperatura a la que se encuentra éste. Éstas se describen a continuación [21]:

$$K_a = 0,01328 + 2,471 * 10^{-5} * T - 4,247 * 10^{-9} * T^2$$

$$\mu_a = 0,04 + 6,155 * 10^{-5} * T - 1,22 * 10^{-8} * T^2$$

$$C_a = 0,2382 + 1,39 * 10^{-5} * T + 1,027 * 10^{-8} * T^2$$

$$\rho_a = 8,55865 * 10^{-2} - 1,5531 * 10^{-4} * T + 1,65602 * 10^{-7} * T^2 - 6,92225 * 10^{-11} * T^3$$

$$\beta_a = 2,15844 * 10^{-3} - 0,757 * 10^{-5} * T + 0,167 * 10^{-7} * T^2 - 0,148 * 10^{-10} * T^3$$

El Coeficiente de transferencia de calor por radiación hr, se expresa por medio de la ecuación (25), el cual depende de las emisividades de los materiales, del radio externo del tubing e interno del casing, así como de sus temperaturas [20].

$$h_r = \frac{\sigma * (T_{to}^2 + T_{ci}^2) * (T_{to} + T_{ci})}{\frac{1}{\epsilon_{to}} + \frac{r_{to}}{r_{ci}} * \left(\frac{1}{\epsilon_{to}} - 1\right)} \quad (25)$$

El intercambio de calor en el espacio anular entre tubing y casing se expresa como se indica en la ecuación (26).

$$\dot{Q} = 2\pi * r_{to} * dz * (hc + hr) * (T_{to} - T_{ci}) \quad (26)$$

---

<sup>16</sup> Número adimensional proporcional al cociente entre la difusividad de momento (viscosidad) y la difusividad térmica.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**4.5.3 Modelo de la variación de la temperatura de la formación con la profundidad.** La temperatura de la formación aumenta linealmente con la profundidad y se expresa matemáticamente como lo indica la ecuación (27) [20].

$$T_{\text{form}}(z) = T_P - (\text{Prof}_p - z) * g_G \quad (27)$$

$$g_G = \frac{T_p - T_{\text{amb}}}{\text{Prof}_p} \quad (28)$$

En dónde:

$T_{\text{amb}}$ : Temperatura ambiente.

$T_P$ : Temperatura de fondo de pozo.

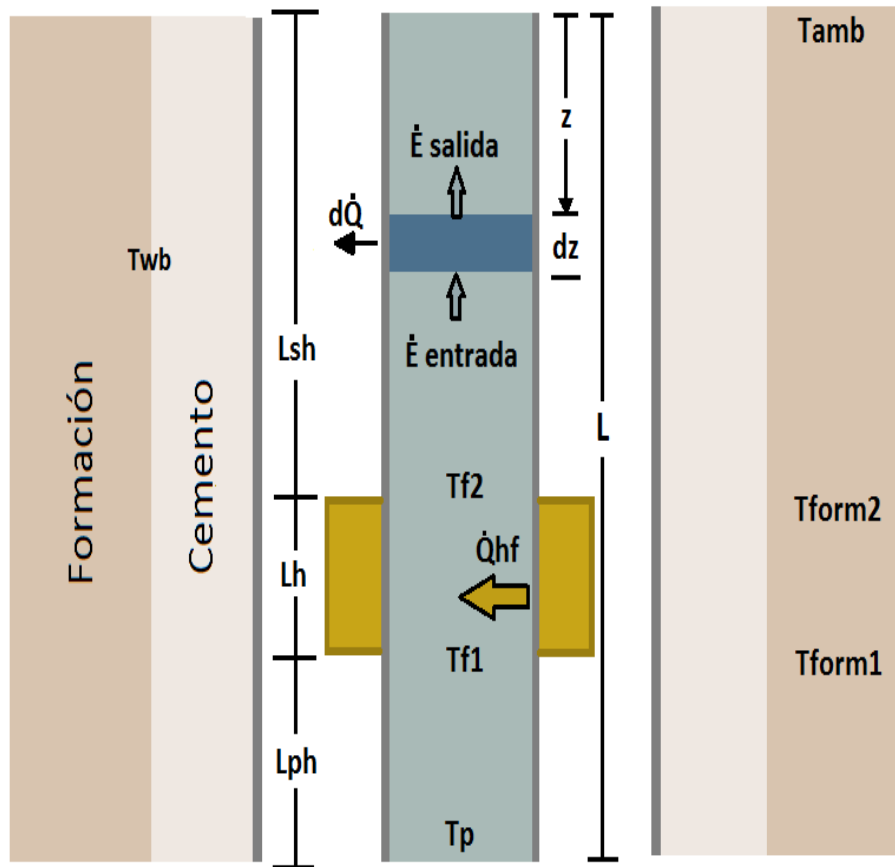
$\text{Prof}_p$ : Longitud del Tubing.

$g_G$ : Gradiente geotérmico.

**4.5.4 Modelado de transferencia de calor en estado estable: Después del calentamiento realizado por la hornilla.** Las pérdidas de calor en el crudo ocurren por la diferencia de temperatura entre éste y la formación, lo que ocasiona una variación en la temperatura del crudo con la profundidad. Por lo tanto, para realizar el modelo se plantea un balance de masa y energía, el cual tiene en cuenta la energía transportada por el flujo másico, las pérdidas de energía, la energía potencial y la energía cinética. Ver figura 30.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 30. Diagrama de balance de masa y energía



Fuente: Los autores.

Se tiene que la energía de un fluido en movimiento por unidad de masa se expresa por medio de la ecuación (29) [18].

$$\theta = PV_{esp} + e = PV_{esp} + (u + e_c + e_p) \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (29)$$

Además se sabe que la entalpia está definida por la ecuación (30):

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

$$H = PV_{\text{esp}} + u \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (30)$$

Luego se reemplaza la ecuación (30) en la ecuación (29) de donde resulta la ecuación (31).

$$\theta = H + \frac{V^2}{2} + g * z \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (31)$$

Al multiplicar la ecuación (31) por el caudal de flujo másico que maneja el pozo C25, se obtiene la ecuación (32) que representa la tasa de flujo de energía con el caudal.

$$\dot{E}_{\text{masa}} = w * \theta = w * \left( H + \frac{V^2}{2} + g * z \right) \text{ [kW]} \quad (32)$$

Al realizar un balance de masa y energía para una sección de crudo en cualquier punto del tubing como se muestra en la figura 33, se obtiene:

$$\dot{E}_{\text{entrada}} = \dot{E}_{\text{salida}} \quad (33)$$

$$\dot{Q}_{\text{entrada}} + \dot{W}_{\text{entrada}} + \dot{E}_{\text{masa entrada}} = \dot{Q}_{\text{salida}} + \dot{W}_{\text{salida}} + \dot{E}_{\text{masa salida}} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} w * H_{\text{entrada}} + z * w * g + \frac{1}{2} * w * V_{\text{entrada}}^2 & \quad (35) \\ = w * H_{\text{salida}} + (z + dz) * w * g + \frac{1}{2} * w * V_{\text{salida}}^2 - d\dot{Q} * dz \end{aligned}$$

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

$$\frac{dH}{dz} + g + v * \frac{dv}{dz} = \frac{d\dot{Q}}{w} \quad (36)$$

La entalpia es una función de la presión y temperatura. Ésta se puede expresar según la ecuación (37) [20].

La ecuación (38) es el resultado de reemplazar la ecuación (37) en la ecuación (36).

$$dH = \left( \frac{\partial H}{\partial T_p} \right) * dT + \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T * dP = c_p * dT - C_J * c_p * dp \quad (37)$$

$$\frac{dT_f}{dz} = C_J * \frac{dP}{dz} + \frac{1}{c_p} * \left[ \frac{d\dot{Q}}{w} - g - v * \frac{dv}{dz} \right] \quad (38)$$

$$C_J = \frac{v}{c_p} * \left[ \frac{\partial H}{\partial p} \right]_T = \frac{v}{c_p} = \frac{1}{\rho * c_p} \quad (39)$$

Siendo  $C_J$  el coeficiente de Joule-Thomson.

Por otra parte se tiene que el cambio de presión con la profundidad es aproximadamente igual a densidad del crudo por la gravedad (ecuación (40)) [20]:

$$\frac{dp}{dz} = \rho * g \quad (40)$$

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Al reemplazar las ecuaciones (39) y (40) en la ecuación (38), se obtiene la ecuación (41):

$$\frac{dT_f}{dz} = \frac{g}{c_p} + \frac{1}{c_p} \left[ \frac{d\dot{Q}}{W} - g \right] \quad (41)$$

La ecuación (41) representa la variación de la temperatura del crudo respecto de la profundidad.

La transferencia de calor del crudo hacia la formación está dada por la ecuación (42), que depende de la diferencia de temperatura entre el crudo y la formación y, del coeficiente de transferencia de calor total  $U_{to}$  [20]:

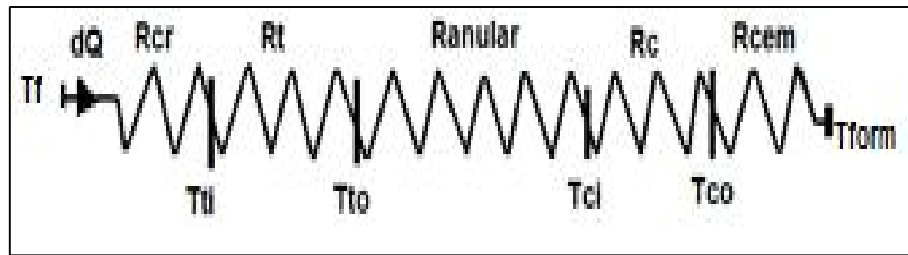
$$d\dot{Q} = A * U_{to} * (T_f - T_{form}) \quad (42)$$

Dónde:  $A = 2 * \pi * r_{to} * dz$

Ahora bien,  $U_{to}$  es el coeficiente de transferencia de calor total que representa un equivalente de todos los medios del pozo (tubing, espacio anular, casing, cemento) en estado estable, los cuales se pueden modelar como resistencias térmicas (ver figura 31), cuya deducción se encuentra en el anexo C.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 31. Modelo de resistencias térmicas en estado estable

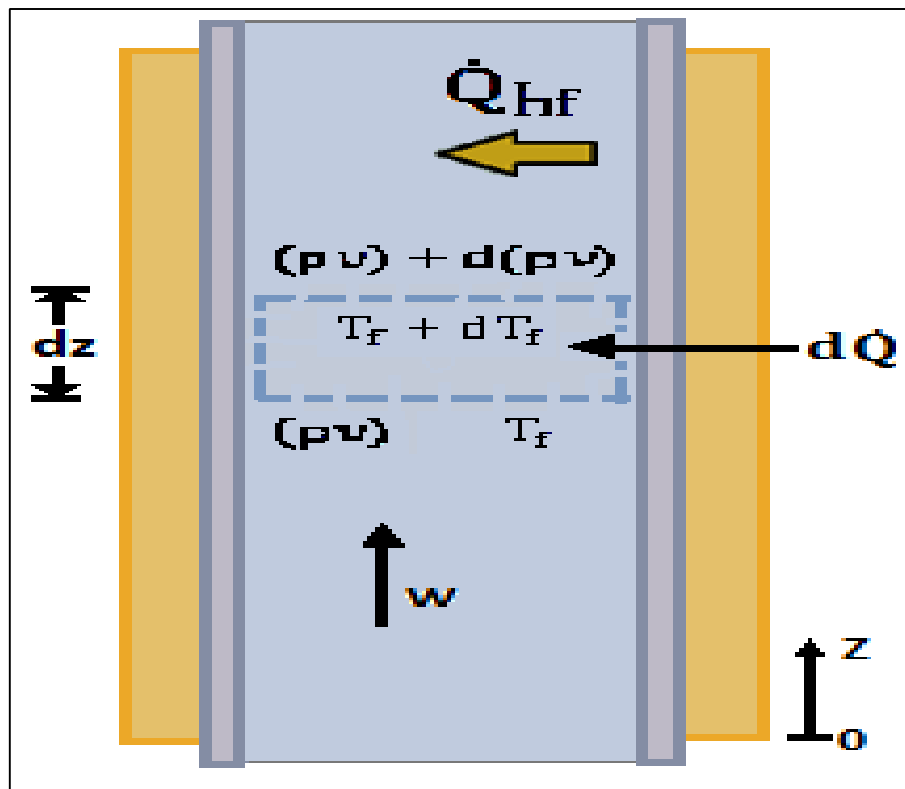


Fuente: Los autores.

Para resolver las ecuaciones (41) y (42) se debe aplicar un método iterativo ya que el coeficiente de transferencia total  $U_{to}$  contiene los coeficientes de convección y radiación y estos dependen de la diferencia de temperatura entre la superficie externa del tubing e interna del casing (ver anexo C).

**4.5.5 Modelo de temperatura del crudo al pasar por la sección donde se ubica la hornilla.** Se realiza un balance de masa y energía para el crudo que pasa por la sección donde se ubica la hornilla teniendo en cuenta los efectos y condiciones que se muestran en la figura 32.

Figura 32. Balance de energía del crudo



Fuente: Los autores.

Realizando un balance de masa y energía en la sección de la hornilla se tiene la ecuación (44):

$$d\dot{Q} + w(C_v * T_m + Pv) - [w * (C_v * T_m + Pv) + w * d(C_v * T_m + Pv)] = 0 \quad (43)$$

$$d\dot{Q} = w(C_v * T_m + Pv) = 0 \quad (44)$$

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Suponiendo que el fluido se comporta como un gas ideal [19]. ( $Pv = RT_m$ ,  $C_p = C_v + RT_m$ ), entonces se llega a la ecuación (47) que representa el comportamiento de la temperatura del crudo al pasar por la sección de la hornilla:

$$d\dot{Q} = w * C_p * dT_m \quad (45)$$

$$\frac{dT_m}{d\dot{Q}} = \frac{1}{w * C_p} \quad (46)$$

$$T_m(z) = \frac{1}{w * C_p} * \left[ \frac{\dot{Q}_{hf}}{Lh} * z \right] + T_{f1} \quad (47)$$

**4.5.6 Solución del modelo térmico.** La finalidad de la solución del modelo es encontrar la profundidad en la cual se deben ubicar la(s) hornilla(s) y determinar el calor que se debe entregar al crudo considerando la temperatura de cristalización en la superficie del pozo, así como la temperatura a la que va funcionar la(s) hornilla(s). En la tabla 7 se resume el conjunto de ecuaciones que definen el comportamiento térmico del crudo a lo largo de la tubería de producción.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 7. Conjunto de ecuaciones del modelo en estado estable del comportamiento térmico del crudo

N° Ecuación	Ecuación	Fenómeno que describe
41	$\frac{dT_f}{dz} = \frac{g}{c_p} + \frac{1}{c_p} \left[ \frac{d\dot{Q}}{w} - g \right]$	Variación de la temperatura del crudo respecto de la profundidad
42	$d\dot{Q} = A * U_{t_o} * (T_f - T_{form})$	La transferencia de calor del crudo hacia la formación. depende de la diferencia de temperatura del crudo y la formación y, del coeficiente de transferencia de calor total $U_{t_o}$
47	$T_m(z) = \frac{1}{w * C_p} * \left[ \frac{\dot{Q}_{hf}}{Lh} * z \right] + T_{f1}$	Modelo de temperatura del crudo al pasar por la sección donde se ubica la hornilla

Fuente: Los autores.

Para encontrar la solución, se utilizan los datos del pozo 25 y se emplea un método iterativo con el cual se discretiza<sup>17</sup> la ecuación (41), obteniendo la ecuación (48).

$$T_f(i + 1) = (2h) * \left( \frac{g}{c_p} + \frac{1}{c_p} \left[ \frac{d\dot{Q}}{w} - g \right] \right) + T_f(i - 1) \quad (48)$$

<sup>17</sup> En esta solución se emplea un paso de  $h=0,5$  m.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Posterior a esto, se realiza un Script<sup>18</sup> en Matlab versión 2013 para dar solución al conjunto de ecuaciones de la tabla 7 (ver anexo E). Con base en los resultados de la programación se determina que se necesitan dos hornillas de calentamiento para asegurar la temperatura de cristalización en la superficie o cabeza del pozo. La ubicación de las hornillas a lo largo del tubing se indica en la tabla 8.

Tabla 8. Condiciones de operación de las hornillas

	Ubicación de la hornilla	Temperatura del crudo a la salida de la hornilla	Potencia de la Hornilla.
<b>Hornilla 1</b>	185 m	94,62 °C	1870 W
<b>Hornilla 2</b>	610,21 m	110,2 °C	2000 W

Fuente: Los autores.

En la tabla 8 se indica que se deben emplear dos hornillas ya que con una sola se requieren temperaturas y potencias muy elevadas para calentar el crudo y evitar que se depositen parafinas en el transporte hasta la superficie. La hornilla 1 se ubica a 185 m de profundidad y la hornilla 2 se ubica al final del tubing, es decir a 610,21 m de profundidad<sup>19</sup>.

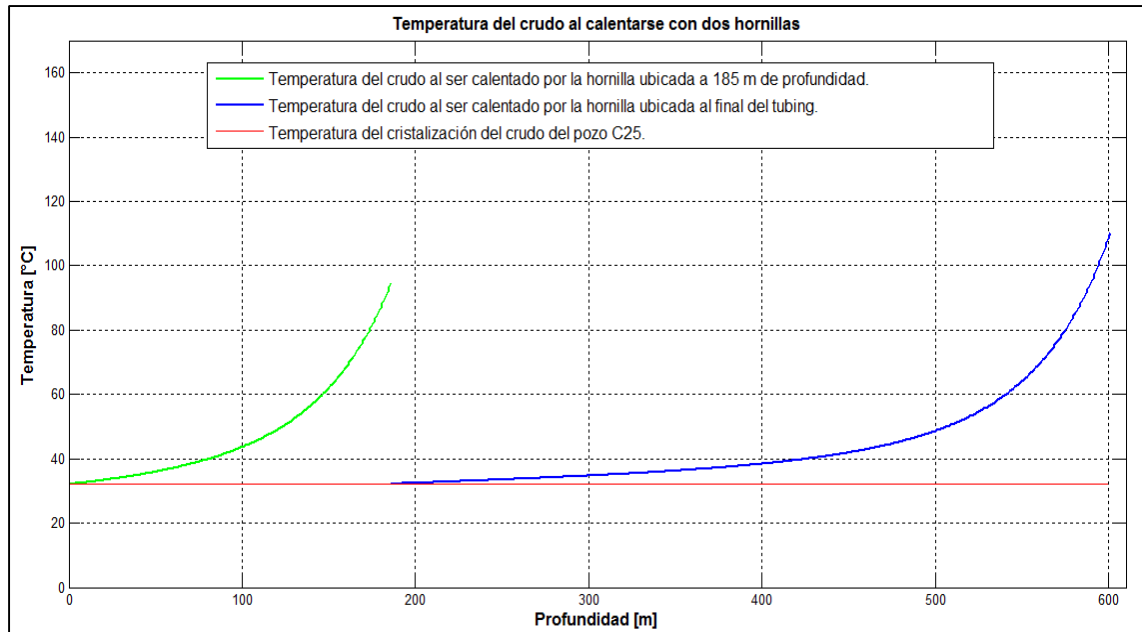
---

<sup>18</sup> Archivo de órdenes programado en Matlab. En este caso en un código Ad Hoc.

<sup>19</sup> Se opta por esta distribución después de realizar pruebas en el código programado de Matlab.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 33. Comportamiento de la temperatura del crudo en el proceso de calentamiento propuesto



Fuente: Los autores.

Además, en la figura 33 se puede evidenciar que al ubicar las dos hornillas a las profundidades indicadas y con la potencia calculada, se soluciona el problema de cristalización de parafinas a lo largo de la tubería ya que se garantiza que la temperatura del crudo en cualquier punto del tubing esté por encima de la temperatura de cristalización ( $32,22^{\circ}\text{C}$ , línea roja en la figura 33) según [5].

## **5. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL CRUDO SECCIÓN HORNILLA**

En esta sección, se utiliza el Toolbox PDEtool de Matlab para realizar la simulación de temperatura de las hornillas y sus medios para longitudes de 2 m, 2,5 m y 3 m de longitud. Se simulan las hornillas colocadas a 185 m y 610,21 m de profundidad, utilizando la potencia que cada una requiere de acuerdo con los cálculos que se realizan en la sección 4.5.6 del presente documento. Esta Toolbox resuelve la ecuación de calor con una ecuación parabólica en la que se introducen los parámetros térmicos que constituyen la(s) hornilla(s).

### **5.1 DISTRIBUCIÓN DE MEDIOS CON LA TOOLBOX EMPLEADA**

Esta Toolbox permite realizar simulaciones en la solución de ecuaciones diferenciales para objetos compactos en 2D, y configuraciones que posean simetría cilíndrica, como es el caso de la configuración de los elementos en pozo. Este software utiliza el método de elementos finitos para solucionar los problemas.

Se cuenta con una interfaz gráfica en la cual se puede colocar los diferentes medios con sus dimensiones<sup>20</sup> como el tubing, resistencia de la hornilla, aislante de la hornilla, aire en el anular, casing, cemento. En cada medio se le introducen sus propiedades térmicas<sup>21</sup> (ver figura 34).

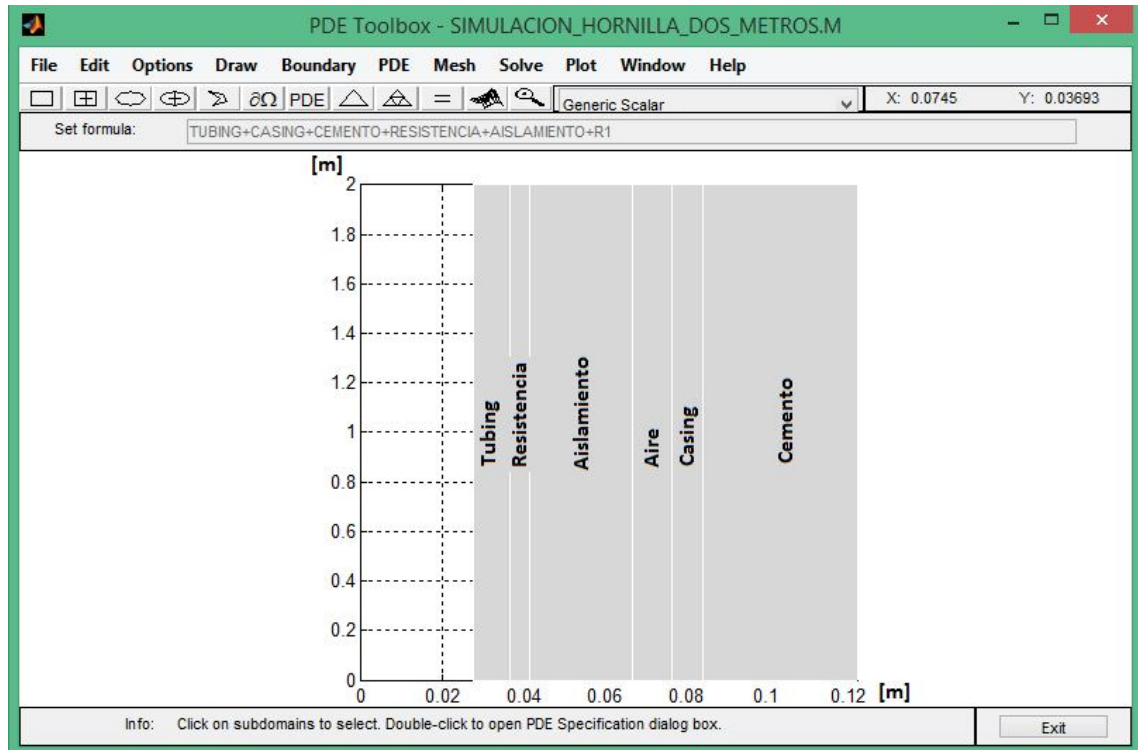
---

<sup>20</sup> Debido a las limitaciones que tiene PDEtool para simular elementos de dimensiones muy grandes (por ejemplo la transferencia de calor en los 610, 21 m del tubing) se hace el análisis pertinente para la sección en donde se encuentra ubicada cada hornilla. Esto se debe al costo computacional que demanda procesar cientos de datos a la vez.

<sup>21</sup> Para efectos prácticos y por características de simetría, se simula un corte del conjunto de medios respecto al eje central que es el centro del tubing.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 34. Interfaz gráfica de la Toolbox empleada con la distribución de medios presentes en pozo



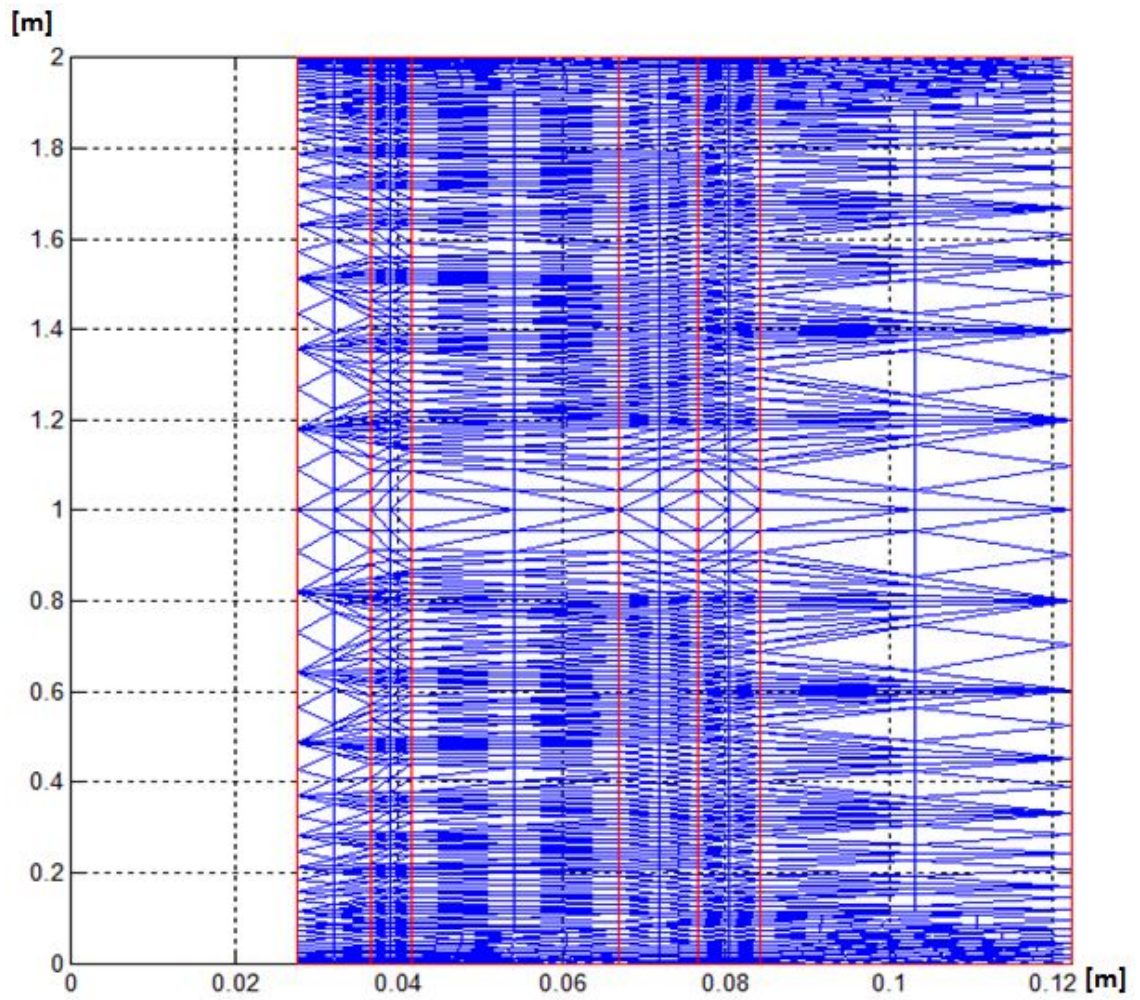
Fuente: Los autores.

Después de esto, en la figura 35 se procede a colocar las condiciones de frontera y el enmallado<sup>22</sup> que se considere necesario.

<sup>22</sup> El enmallado que se seleccione determina la precisión con la que se deseen obtener los resultados de simulación. Es decir, entre más fino sea éste, el grado de incertidumbre será menor en los datos de salida que tenga la simulación.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 35. Enmallado de simulación



Fuente: Los autores.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

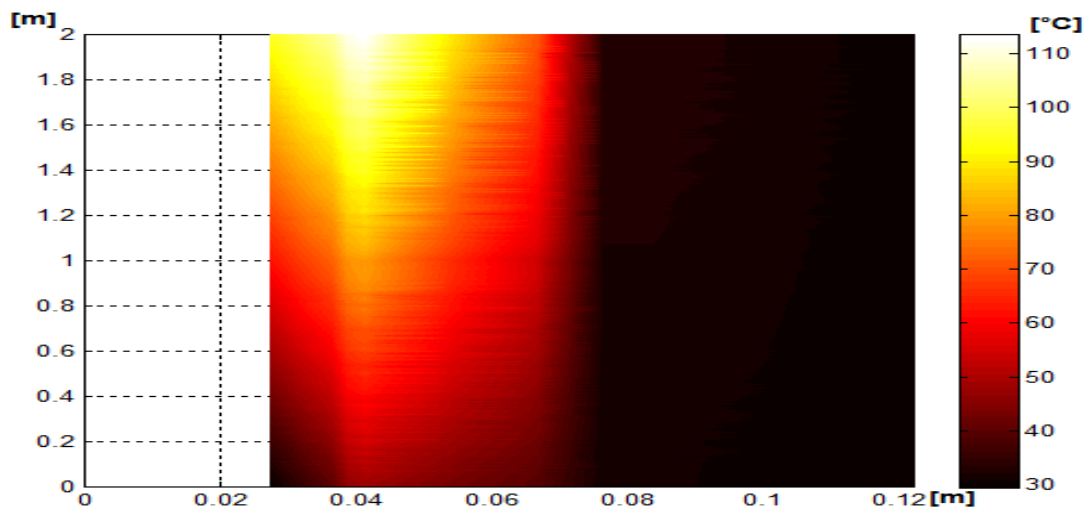
## 5.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Al realizar las simulaciones se obtienen gráficas que muestran la temperatura del sistema de calentamiento (hornilla) para las longitudes 2 m, 2,5 m y 3 m de la hornilla. Se visualiza la temperatura en cualquier parte del sistema, además se puede obtener el valor de temperatura de cada nodo del enmallado<sup>23</sup>.

### 5.2.1 Resultados de simulación de hornilla a 185 m de profundidad.

- **Hornilla de 2 m.**

Figura 36. Hornilla de 2 m de longitud ubicada a 185 m de profundidad



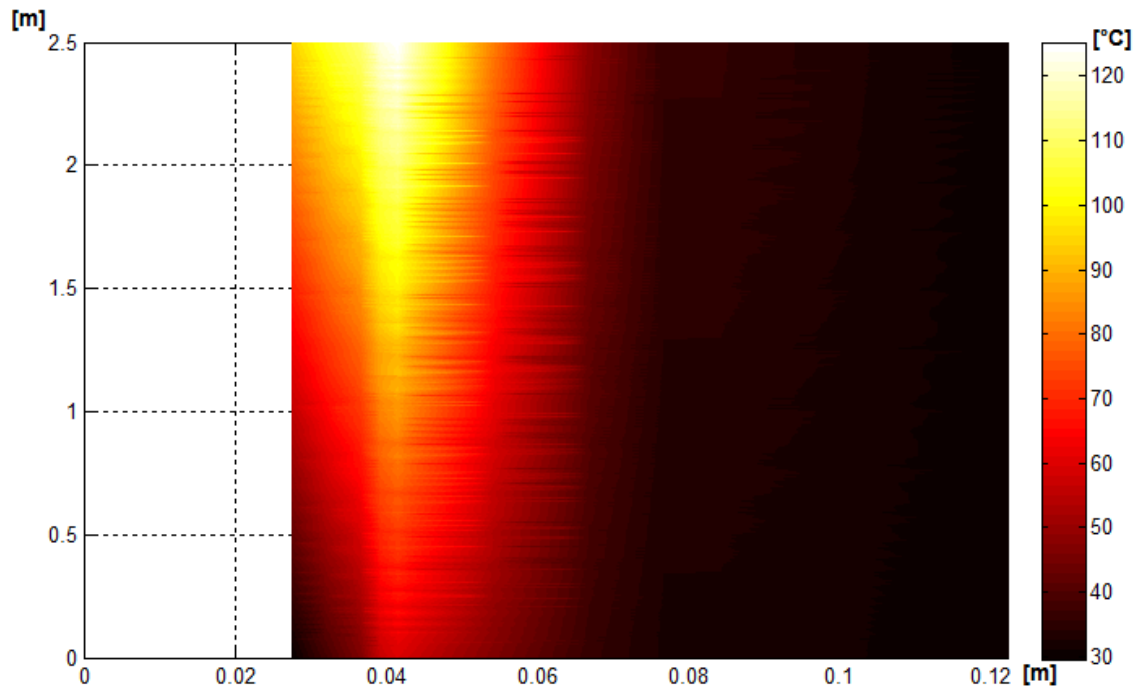
Fuente: Los autores.

<sup>23</sup> Si se desea obtener la temperatura en un punto específico de la configuración, se debe identificar el nodo al que corresponde el punto de análisis (revisar esto en la tabla que se exporta de PDEtool).

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- **Hornilla de 2,5 m.**

Figura 37. Hornilla de 2,5 m de longitud ubicada a 185 m de profundidad

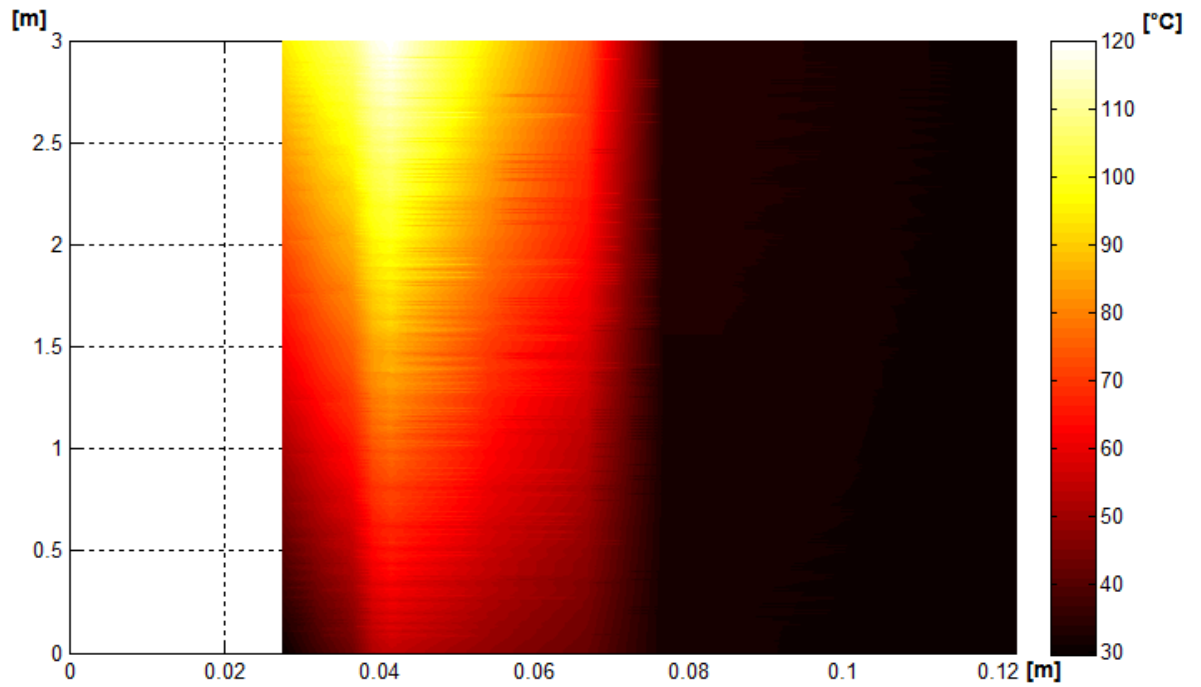


Fuente: Los autores.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- **Hornilla de 3 m.**

Figura 38. Hornilla de 3 m de longitud ubicada a 185 m de profundidad



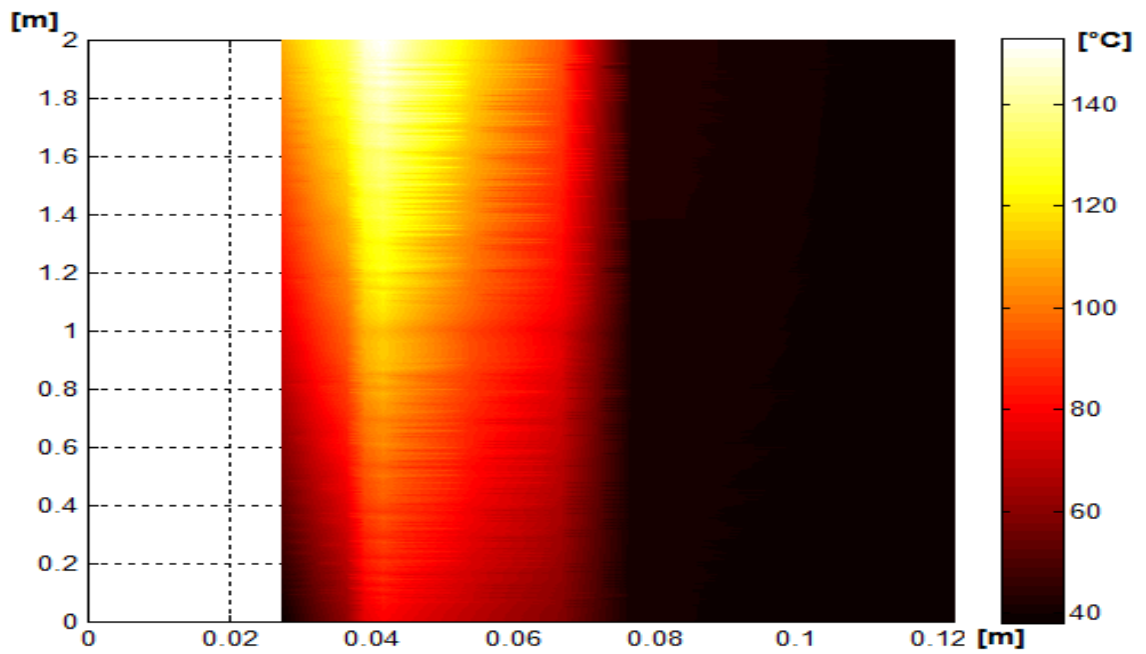
Fuente: Los autores.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

### 5.2.2 Resultados de simulación de hornilla a 610,21 m de profundidad.

- Hornilla de 2 m.

Figura 39. Hornilla de 2 m de longitud ubicada a 610,21 m de profundidad

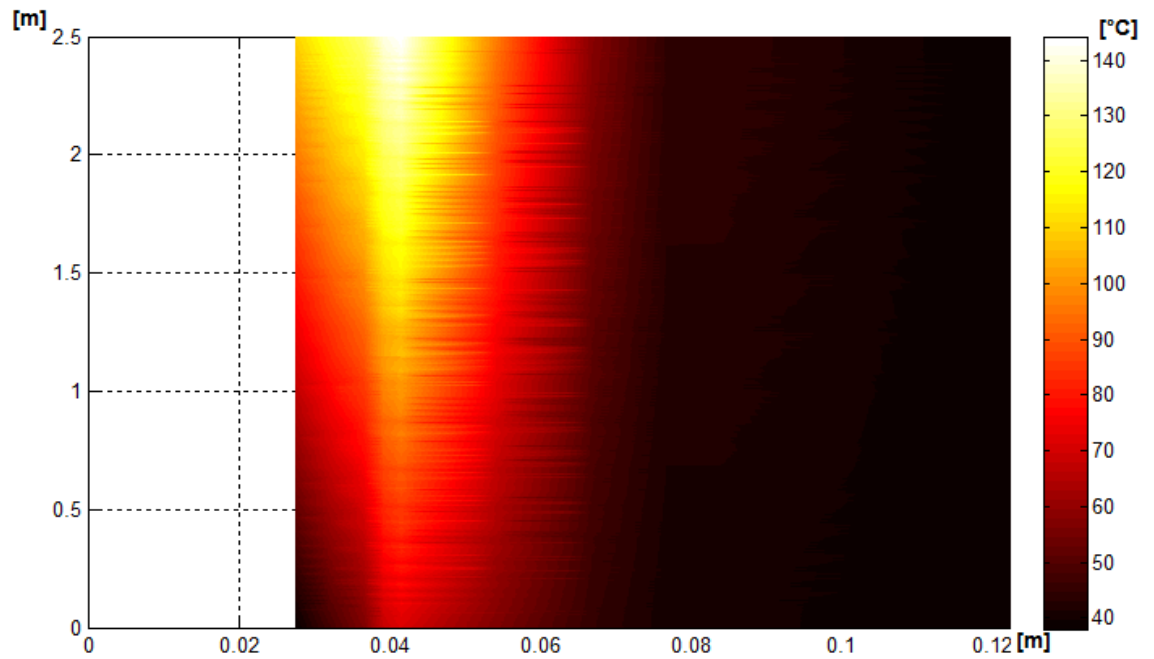


Fuente: Los autores.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- **Hornilla de 2,5 m.**

Figura 40. Hornilla de 2,5 m de longitud ubicada a 610,21 m de profundidad

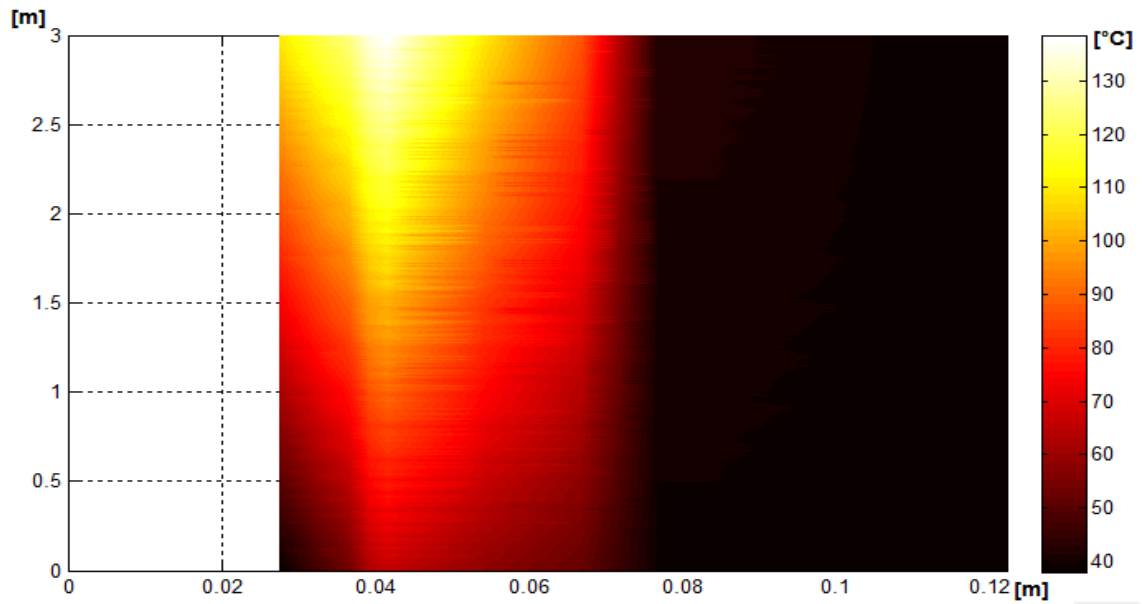


Fuente: Los autores.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- **Hornilla de 3 m.**

Figura 41. Hornilla de 3 m de longitud ubicada a 610,21 m de profundidad



Fuente: Los autores.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

De las simulaciones se puede apreciar que el aislante que recubre las resistencias y, el aire del espacio anular, evitan que el calor generado en las resistencias eléctricas se transfiera a la formación en el área de calentamiento de las hornillas ya que la temperatura que se tiene en esta simulación corresponde a los valores propios en sitio.

Además se puede evidenciar por medio de la simulación en PDEtool que la temperatura que alcanzan las hornillas en su interior corresponde a la que se calcula mediante el modelo térmico desarrollo.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

## 6. SISTEMA DE CALENTAMIENTO

Existen fenómenos eléctricos que cuando se presentan, pueden causar problemas. Si se analizan desde una óptica diferente, tales efectos pueden ser aprovechados en innumerables aplicaciones. Esto sucede con el efecto Joule. Pero, ¿Qué es el efecto Joule?

### **Efecto Joule.**

Este es un fenómeno de efectos irreversibles que reza la siguiente ley:

“Al hacer circular una corriente eléctrica por un conductor, parte de la energía cinética de los electrones en movimiento se transforma en calor debido a los choques que sufren los átomos del material conductor por el que circulan, elevando su temperatura”. [22]

La potencia que se disipa en el conductor se puede calcular con una sencilla ecuación que relaciona la diferencia de potencial entre los extremos del conductor, con la corriente que está circulando por este tal como lo indica la ecuación (49). [23]

$$P_{\text{disipada}} = V * I \quad (49)$$

Este efecto es el que se pretende aprovechar para el calentamiento del crudo parafínico que es transportado por el tubo de producción que se encuentra en el pozo C25 de Campo Escuela Colorado.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

En la sección 3 se hace mención de algunos métodos de calentamiento del crudo con el fin de mejorar su movilidad. Ahora bien, el sistema de calentamiento diseñado en el presente proyecto (hornilla) es de tipo focalizado. La transferencia de calor se presenta con mayor intensidad en una sección del tubing. Esto con el fin de hacer que el sistema sea práctico en cuanto a instalación y operación del mismo.

### **6.1 ESTRUCTURA FÍSICA DE LA HORNILLA**

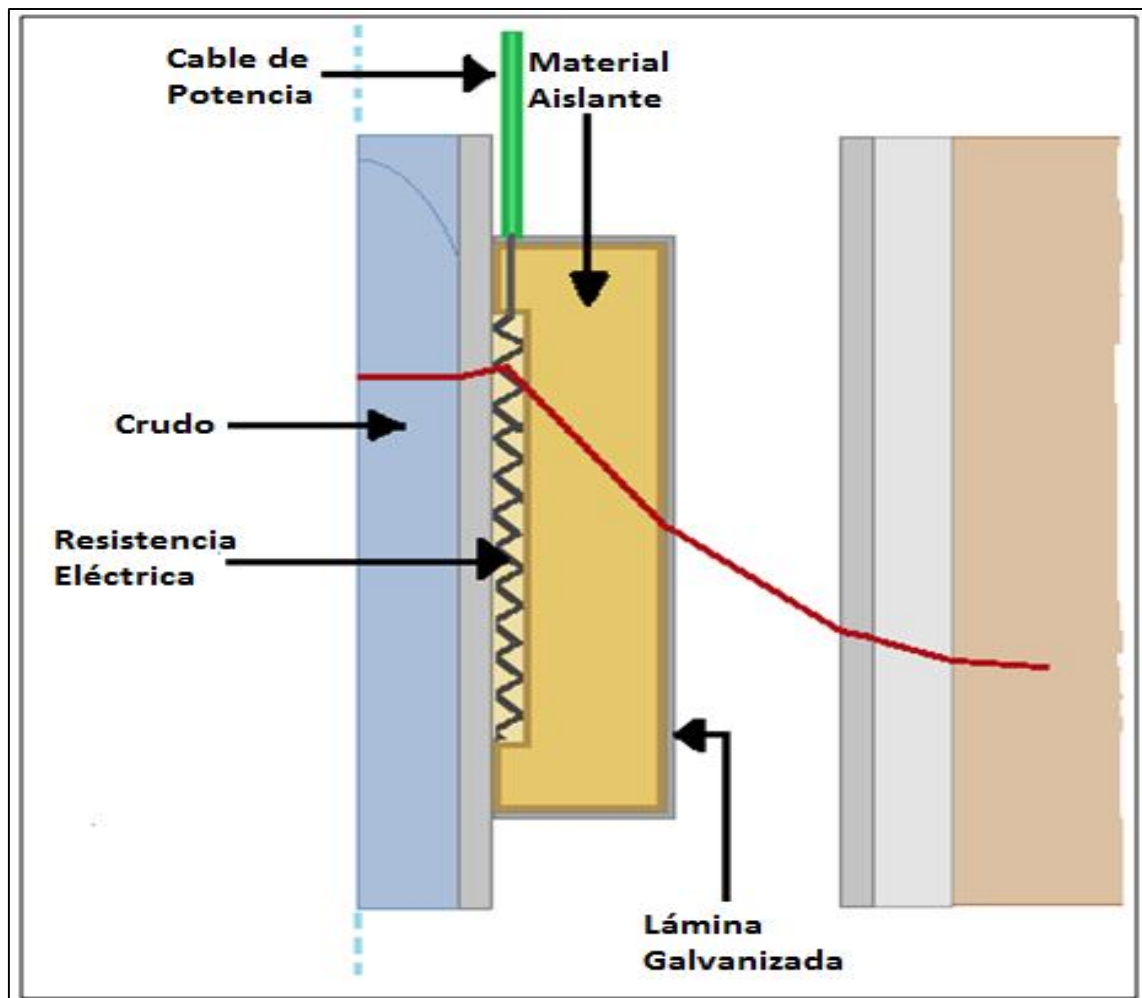
La mencionada hornilla, es parte esencial en el calentamiento del crudo, siendo ésta, un elemento con forma cilíndrica que se instala alrededor del tubing (ver figura 42).

Las partes de esta son:

- Aislante térmico.
- Resistencia calefactora.
- Lámina de protección.
- Conectores resistencia-cable de potencia.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 42. Vista lateral (corte): Diseño de la hornilla de calentamiento



Fuente: Los Autores.

El diseño de la hornilla debe tener características de eficiencia de manera que se garantice que la mayor cantidad del calor generado por ésta, se transfiera al crudo con el mínimo de pérdidas, por lo tanto, esta debe estar recubierta de un material aislante que garantice con alta eficiencia la transferencia de calor hacia el crudo.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Además, sus dimensiones deben ser las adecuadas de manera que se asegure que se pueda instalar en el espacio anular que hay entre el tubing y el casing.

**6.1.1 Aislantes Térmicos.** El aislamiento térmico de la hornilla tiene la función de evitar las pérdidas de calor. Este debe cubrir las resistencias y abrazar el tubing de manera que el calor generado se dirija hacia el crudo. En la elección de aislante es importante tener en cuenta las dimensiones de éste, ya que éste debe adaptarse al espacio anular que hay entre el tubing y el casing.

Un aislante térmico es un material que se caracteriza por su alta resistencia térmica. Impone, naturalmente, una barrera al paso de calor entre dos medios (de mayor a menor temperatura) impidiendo que el calor entre o salga del sistema en particular que se esté implementando.

El aislante por excelencia, es el vacío pero debido a la complejidad para mantener estas condiciones, se buscan otras alternativas que logren simular este comportamiento. Los aislantes, deben tener una característica porosa o fibrosa en su estructura física, con el fin de inmovilizar el aire seco y encapsularlo en su interior.

Los aislamientos se pueden clasificar en [24]:

- ✓ Productos refractarios densos.
- ✓ Productos refractarios aislantes.
- ✓ Productos aislantes no refractarios (hasta 800-1000°C).
- ✓ Productos calorífugos (hasta 100-150 °C).
- ✓ Fibras cerámicas.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- **Productos refractarios densos:**

Los materiales refractarios son productos que resisten temperaturas altas. Se suele decir que son materiales refractarios cuando su resistencia pirosfópica es superior a 1500 °C. Entre ellos están:

- ✓ arcillas refractarias.
- ✓ Silicatos (de aluminio y otros).
- ✓ hidratos y óxidos de aluminio.
- ✓ óxidos tales como sílice, magnesia, cromita, zirconia, etc.

No hay un producto refractario adecuado para todo. Además de su resistencia pirosfópica, interviene la resistencia química, la resistencia a la abrasión, etc. [24]

Se pueden clasificar de acuerdo con su naturaleza mineralógica en:

- a) Refractarios densos de forma. Con porosidades inferiores a 45%.
- b) Refractarios ligeros de forma. Con porosidades superiores al 45%.
- c) Refractario a granel. Estos toman su forma dependiendo de la aplicación concreta en la que se ha de usar.

De igual manera, existe una clasificación adicional que corresponde al material que lo conforma.

- a) Productos refractarios aluminosos.
- b) Productos siliciosos.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- c) Productos de sílice.
- d) Productos básicos a base de magnesia, cromita y dolomita.
- e) Productos refractarios especiales.
- f) Productos refractarios no porosos.
- g) Masas refractarias densas.

- **Productos refractarios aislantes:**

Se dividen en dos grupos:

- a) Aislantes refractarios de forma.

Para entrar en este campo deben ser, por una parte, refractarios (resistencia pirosfópica igual o superior a 1500°C) y aislantes (baja conductividad térmica)

- b) Hormigones refractarios aislantes.

- **Productos aislantes no refractarios (hasta 1000°C):**

Los más representativos son:

- a) La sílice fósil o diatomita.
- b) El carbonato de magnesio (y sus derivados).
- c) Las fibras minerales (lana de vidrio, escoria, roca).
- d) La vermiculita.
- e) La arcilla y la perlita expandidas.
- f) El silicato de calcio.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- **Fibras cerámicas de alta temperatura:**

Las fibras cerámicas se han desarrollado en los últimos años y se han utilizado ampliamente en aislamientos de cara caliente y temperaturas máximas hasta de 1500°C.

Normalmente se fabrican en cuatro calidades bajo diferentes contenidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (últimamente también se fabrican a partir de  $\text{ZrO}_2$ ):

- De 40 por 100  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para temperatura máxima de empleo de 1000°C.
- De 48 por 100  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hasta 1250 °C.
- De 56 por 100  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hasta 1400 °C.
- De 85 por 100  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hasta 1600 °C.

El aislante seleccionado para la disminuir las pérdidas de calor en el proceso de calentamiento del crudo a través de la hornilla es la Lana de Vidrio. [24]

**6.1.1.1 Selección del aislante térmico.** Actualmente, en el mercado de los materiales aislantes, se viene destacando la Lana de Vidrio por sus propiedades térmicas y comodidad económica. Este material es una fibra mineral hecha con filamentos de vidrio que son unidos por medio de un aglutinante. Al pasar estas fibras por este proceso, quedan ciertos espacios de aire entre fibras proporcionando así, una mayor resistencia ante la transferencia de calor de un medio a otro. Este material es provisto por varias empresas del sector, dentro de las cuales es preciso resaltar la empresa colombiana **FIBER GLASS COLOMBIA S.A**, en una presentación llamada “CAÑUELA AMPLIO RANGO” que corresponde a la que se muestra en la figura 43, siendo ésta en medias cañas.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 43. Aislante térmico a emplear para la sección de la hornilla



Fuente: Catálogo de *FIBER GLASS COLOMBIA S.A.*

Dentro de las especificaciones de este material, se tiene que su conductividad térmica es de  $0,0034 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  a  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ . Es aquí, en donde se evidencia que las pérdidas de calor han de ser bastante pequeñas comparadas con la energía que es transferida al crudo. En la figura 44 se puede notar cómo se comporta la conductividad térmica con la variación de la temperatura a la que se encuentra este aislante térmico.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 44. Conductividad térmica del aislante en función de temperatura promedio



Fuente: Catálogo de FIBER GLASS COLOMBIA S.A.

Las dimensiones de este aislante, se obtienen de una tabla consultada con el fabricante de donde se tiene las siguientes medidas por sección de aislante<sup>24</sup>:

- Diámetro interior del aislante: 3" (0,0762 m).
- Espesor del aislante: 1" (0,0254 m).
- Longitud: 0,95 m (por unidad).

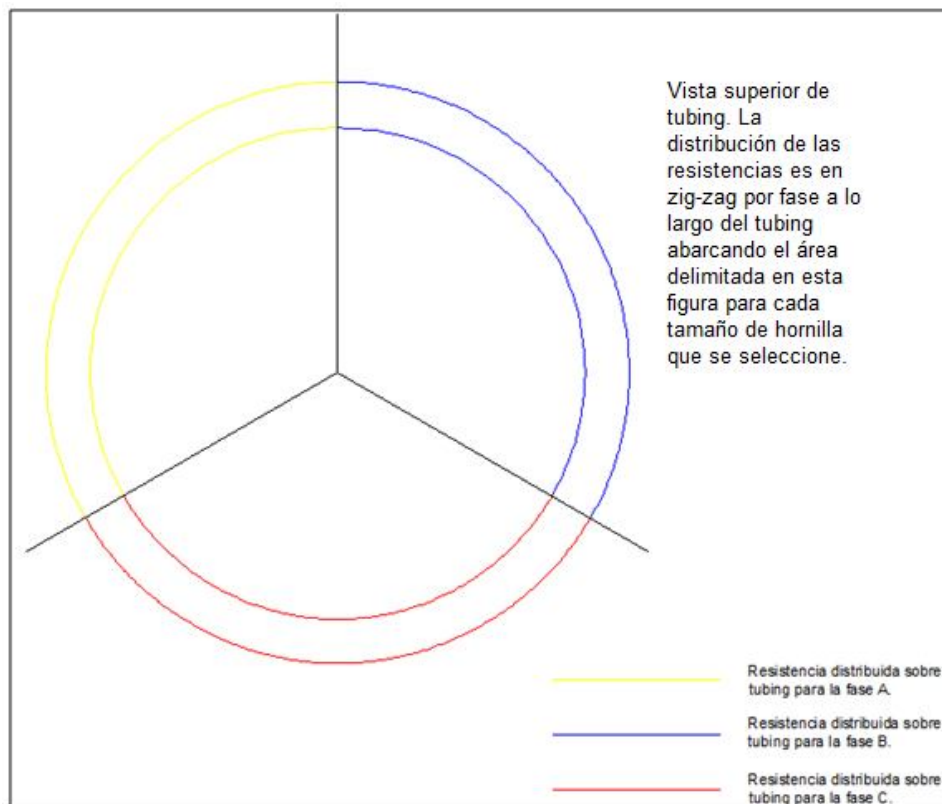
<sup>24</sup> La cantidad de secciones de aislante a emplear es determinada por la longitud de la hornilla de calentamiento.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**6.1.2 Resistencia Calefactora.** En el tema de calentamiento (como en hornos eléctricos), existe la alternativa de implementar el uso de resistencias calefactoras para aplicaciones específicas. Para efectos de este proyecto, estas serán la fuente de calor que garantizará el calentamiento del crudo, en el proceso de prevención y disolución de parafinas.

En cuanto al diseño de la hornilla de calentamiento, se emplea un sistema eléctrico trifásico conectado en estrella, con el fin de lograr una conexión sencilla en la construcción e instalación. Éstas deben distribuirse alrededor del tubing como se indica en la figura 45.

Figura 45. Conexión de las resistencias empleadas en la hornilla



Fuente: Los autores.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Las resistencias eléctricas cumplen la función de transformar la energía eléctrica en energía térmica. El valor de las resistencias depende de la resistividad del material con que se fabrique, y de sus dimensiones. El tipo de material de la resistencia es importante ya que cada una tiene la temperatura de fusión, densidad, calor específico y, conductividad térmica diferente. Bajo estas características, se debe seleccionar la resistencia que mejor se ajuste a las condiciones del pozo.

En el mercado de resistencias calefactoras se tienen básicamente 4 clasificaciones que se emplean en hornos industriales:

- ✓ Metálicas.
- ✓ No metálicas.
- ✓ Tubos radiantes.
- ✓ Resistencias blindadas.

De estos grupos se selecciona las de tipo metálicas, teniendo en cuenta que son más económicas y que, por sus características operativas (rango de temperatura de operación), se pueden adaptar al sistema en donde han de trabajar.

- **Resistencias metálicas.**

Los materiales que se emplean en la fabricación de resistencias metálicas se clasifican en tres grupos:

- a) **Aleaciones de base Ni-Cr.**

Las resistencias de aleaciones de Ni-Cr varían según el fabricante, pero entre las más representativas se encuentran las siguientes:

- ✓ 80 Ni-20 Cr.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- ✓ 70 Ni-30 Cr.
- ✓ 60 Ni-15 Cr-20 Fe.
- ✓ 37 Ni-18 Cr-40 Fe denominada 40 Ni-20 Cr.
- ✓ 30 Ni-20 Cr-25 Fe.
- ✓ 20 Ni-25 Cr-50 Fe.

En la industria de hornos eléctricos las más utilizadas son las aleaciones 80Ni-20Cr. En la tabla 9 se muestran las principales propiedades de las resistencias de aleaciones de Ni-Cr.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 9. Características de las aleaciones de resistencias eléctricas

<b>Aleación Ni-CR</b>	<b>80-20</b>	<b>70-30</b>	<b>60-15</b>	<b>40-20</b>	<b>30-20</b>	<b>20-25</b>
Composición Aproximada						
Ni%	80	70	60	37	30	20
Cr%	20	30	15	18	20	25
Fe%	<1	<1	20	40	45	50
Densidad kg/m <sup>3</sup>	8000	8100	8200	7900	7900	7800
Temperatura de fusión °C	1400	1380	1390	1390	1390	1380
Temperatura máxima de utilización °C	1200	1250	1150	1100	1100	1050
Calor específico a 20 °C kJ/kg*°K	0,45	0,45	13	13	13	13
Conductividad térmica W/m*°K a 20 °C	15	14	13	13	13	13
Coeficiente dilatación lineal 20-1000 °C/°C <sup>-1</sup>	18	18	17	19	19	19
Resistencia a la rotura 20°C N/mm <sup>2</sup>	700	800	700	700	700	700
900°C N/mm <sup>2</sup>	1000	100	100	120	120	120
Resistencia al creep 800°C N/mm <sup>2</sup>	15	15	15	20	20	20
1000°C N/mm <sup>2</sup>	4	4	4	4	4	4

Fuente: [24].

En cuanto a la conductividad térmica, se tiene que es prácticamente igual en todas las aleaciones Ni-Cr-Fe a 20 °C, sin embargo al aumentar la temperatura en la resistencia, aumenta las conductividades de las aleaciones Ni-Cr-Fe. En la tabla 10 se puede evidenciar este efecto.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 10. Conductividad térmica de aleaciones Ni-Cr-Fe

Temperatura	0°C	100°C	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C
Acero 0.20% C	51,9	51,9	48,5	42,7	35,6	25,9	27,7
80 Ni-20 Cr	12,2	13,8	15,6	18,9	22,6	22,6	22,6
60 Ni-15 Cr	11,6	11,9	12,2	12,7	13,1	13,1	13,1
20 Ni-25 Cr	13,8	13,8	14,2	16,5	16,5	16,5	16,5

Fuente: [24].

**b) Aleaciones Fe-Cr-Al, con posible adición de elementos de tierras raras, obtenidas por fusión o por pulvimetalurgia.**

Existe una variación mayor entre los diversos fabricantes que en las aleaciones de Ni-Cr. Las más importantes son:

- 22/25 Cr-6 Al-70 Fe
- 20/22 Cr-5 Al-72 Fe
- 20/22 Cr-4.5 Al-73 Fe
- 14 Cr-4 Al-80 Fe

A muchas de estas aleaciones se les adiciona Ytrio lo que aumenta considerablemente la ductilidad después de un funcionamiento prolongado a alta temperatura.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 11. Características principales de las aleaciones de Fe-Cr-Al

Aleación	22-6 PM	22-6	22-5	22-4	14-4
Composición química aproximada					
Cr%	22	22	22	22	14
Al%	5,8	5,8	5,3	4,8	4
Fe%	70	70	72	73	80
Densidad kg/m <sup>3</sup>	7100	7100	7150	7250	7300
Temperatura de fusión °C	1500	1500	1500	1500	1500
Temperatura máxima de utilización °C	1400	1400	1400	1300	1100
Calor específico a 20 °C kJ/kg*°K	0,46	0,46	0,46	0,46	0,48
Calor específico medio a 0-1000 °C kJ/kg*°K	0,54	0,54	0,54	0,54	0,56
Conductividad térmica a 20 °C W/m*°K	13	13	13	13	15
Coefficiente de dilatación lineal	15	15	15	15	15
Resistencia a la rotura 20°C N/mm <sup>2</sup>	750	800	800	800	700
900°C N/mm <sup>2</sup>	40	34	37	34	35
Resistencia al creep 800°C N/mm <sup>2</sup>	14	6	8	6	4
1000°C N/mm <sup>2</sup>	1,8	1	1,5	1	0,8
Aleación	22-6 PM	22-6	22-5	22-4	14-4
Composición química aproximada					

Fuente: [24].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

En la tabla 11 se indican las características principales de las aleaciones de Fe-Cr-Al, en la cual se aprecia que la resistividad eléctrica es más elevada que las aleaciones de Ni-Cr lo que es favorable en el cálculo de resistencias eléctricas.

En relación con las aleaciones de Ni-Cr las aleaciones de Fe-Cr-Al presentan las siguientes características:

- La densidad es netamente inferior.
- La temperatura de fusión es más elevada.
- La temperatura máxima de utilización es más alta.
- El calor específico y la conductividad térmica son similares.
- La dilatación lineal es más baja.
- La resistencia a la rotura en caliente y la resistencia al calor son más bajas, lo que exige el uso de aleaciones Ni-Cr cuando se requieren buenas propiedades mecánicas en caliente.

**c) Otros materiales metálicos. empleados, sobre todo, en hornos de vacío de alta temperatura, como molibdeno, tántalo y tungsteno.**

Otros tipos de materiales son empleados en hornos de vacío de alta temperatura. Las resistencias pueden estar hechas de molibdeno, tántalo y tungsteno. El molibdeno tiene un punto de fusión de 2600°C, admite cargas específicas de 15-20 W/m<sup>2</sup>, pero por empezar a oxidarse a 600°C, debe operar en vacío o en atmosfera reductora. La resistividad varía fuertemente con la temperatura (5,7 veces superior a 1500°C que a 20°C, lo que exige el empleo de transformadores con tomas para el arranque, el funcionamiento a la temperatura de trabajo e intermedias. Se utiliza frecuentemente en hornos de vacío para temperaturas inferiores 1600-1700°C [24].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

El tántalo tiene un punto de fusión de 3030°C y se utiliza en horno de vacío en forma de hilos arrollados hasta temperatura s de 2300-2400°C. Su resistividad a 1500°C es seis veces superior que a 20°C. Con el tungsteno se puede llegar a temperaturas de 2500-2700°C en hornos de alto vacío. Su resistividad a 1500°C es 6,7 superior que a 20°C [24]. En la tabla 12, se resume la resistividad eléctrica de las aleaciones Fe-Cr-Al.

Tabla 12. Resistividad eléctrica de las aleaciones Fe-Cr-Al

Aleación	22-6 PM	22-6	22-5	22-4	14-4
Resistividad eléctrica $\mu\Omega\text{cm}$ .					
Coeficiente de resistividad:					
20°C	145	145	139	135	125
20°C	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100°C	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01
200°C	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02
300°C	1,00	1,00	1,01	1,01	1,03
400°C	1,00	1,00	1,02	1,02	1,04
500°C	1,01	1,01	1,03	1,03	1,05
600°C	1,02	1,02	1,04	1,04	1,07
700°C	1,02	1,02	1,04	1,05	1,09
800°C	1,03	1,03	1,05	1,06	1,11
900°C	1,03	1,03	1,05	1,06	1,13
1000°C	1,04	1,04	1,06	1,07	1,14
1100°C	1,04	1,04	1,06	1,07	1,15
1200°C	1,04	1,04	1,06	1,08	-
1300°C	1,04	1,04	1,06	1,08	-
1400°C	1,05	1,05	1,07	-	-

Fuente: [24].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**6.1.2.1 Cálculo de la resistencia calefactora.** Para determinar las características propias de las resistencias que requieren las dos<sup>25</sup> hornillas de calentamiento se debe partir de ciertos parámetros como los que a continuación se describen [24]:

- Potencia que se requiere que entregue la hornilla 1 (trifásica): 1,870 kW.
- Potencia que se requiere que entregue la hornilla 2 (trifásica): 2 kW.
- Tensión de operación: 440 V.
- Diámetro de la resistencia de la hornilla 1: 1 mm.
- Diámetro de la resistencia de la hornilla 2: 1 mm.
- Temperatura máxima de operación de la resistencia de la hornilla 1<sup>26</sup>: 94,92°C.
- Temperatura máxima de operación de la resistencia de la hornilla 2<sup>27</sup>: 110,2°C.

Además el sistema de alimentación de las hornillas 1 y 2 es trifásico y las resistencias conectadas en estrella como se indica en la figura 46.

---

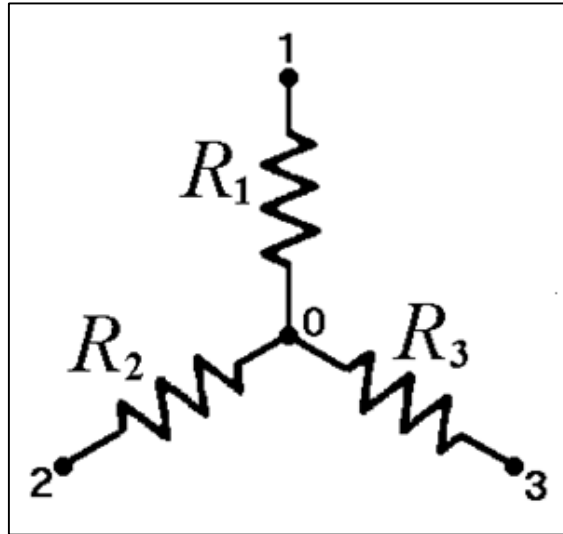
<sup>25</sup> Ver figura 58 que corresponde a la distribución de las hornillas a lo largo del tubing.

<sup>26</sup> Ésta se obtiene de la simulación realizada con PDETOOL Matlab®.

<sup>27</sup> Ésta se obtiene de la simulación realizada con PDETOOL Matlab®.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 46. Conexión de las resistencias calefactoras



Fuente: Los autores.

Por lo tanto la resistencia eléctrica viene dada por la ecuación (50):

$$R_t = \frac{V^2}{P_\emptyset} \quad (50)$$

Dónde:

$R_t$  = Resistencia eléctrica.

$V$  = Tensión eléctrica a la que está sometida la resistencia.<sup>28</sup>

---

<sup>28</sup> En este caso por ser una conexión en estrella, la tensión de diseño corresponde a la tensión fase neutro del sistema.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

$P_{\phi}$  = Potencia por fase (por resistencia).

Entonces

$$R_t = \frac{254^2}{623,3} = 103,51 \Omega$$

Ahora sabiendo que  $A = \pi r^2$  es el área de la resistencia y que la resistencia de un conductor es la que expresa la ecuación (51):

$$R_t = \frac{\rho_r L}{A} \tag{51}$$

Siendo  $\rho_r$  la conductividad eléctrica.

Se despeja la longitud que debe tener la resistencia descrita por la ecuación (52):

$$L = \frac{R_t A}{\rho_r} \tag{52}$$

Con base en [24] se tiene que  $\rho_r$  para la temperatura de operación de la resistencia de la hornilla 1 es igual a  $113 \mu\Omega \text{ cm}$ . Por lo tanto con estos datos de entrada en la ecuación (52) se tiene que la longitud de la resistencia debe ser de 72 m.

Ahora bien, siguiendo la misma metodología para calcular las demás características de la resistencia de la hornilla 2 teniendo en cuenta que  $\rho_r$  para ésta es igual a  $113 \mu\Omega \text{ cm}$  entonces la longitud de la hornilla 2 es de 67 m.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

En la tabla 13 se resumen las características de las resistencias eléctricas para cada una de las hornillas.

Tabla 13. Características de las resistencias eléctricas

Parámetro	Hornilla 1	Hornilla 2
Potencia que debe entregar cada resistencia por fase [kW].	0,6233	0,666
Diámetro de la resistencia [mm].	1	1
Tipo de conexión eléctrica de las resistencias.	Estrella	Estrella
Tensión de operación (de fase) [V].	254	254
Longitud total (por fase) [m].	72	67
Corriente por cada resistencia [A].	2,45	2,62
Resistencia eléctrica [ $\Omega$ ]	103,51	96,77
Composición química	80 Ni-20 Cr	80 Ni-20 Cr

Fuente: Los autores.

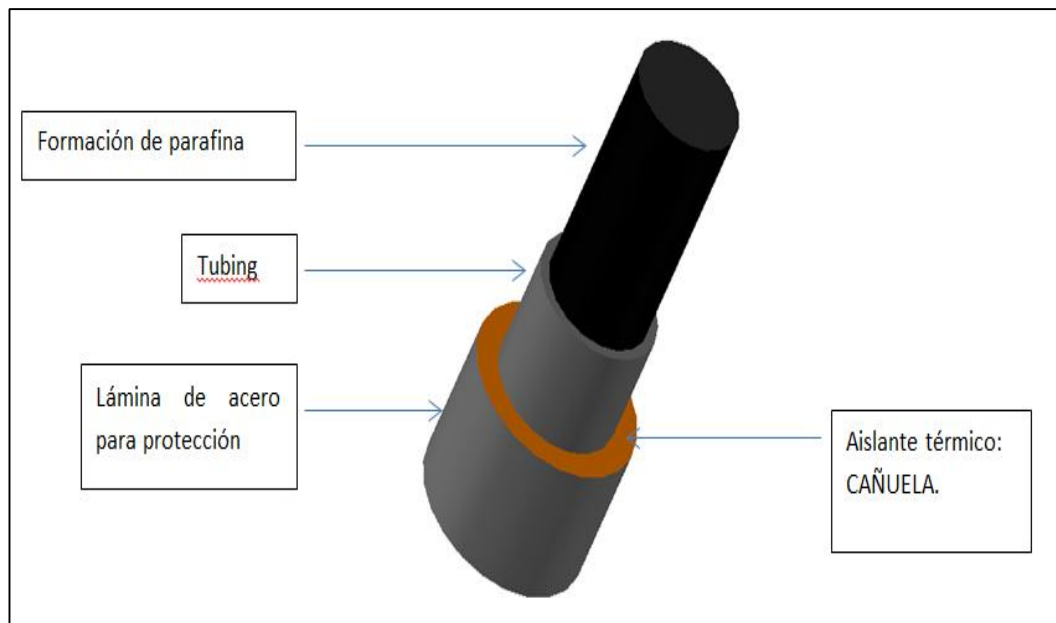
Las resistencias por fase deben ser distribuidas en una tercera parte (1 por fase eléctrica) del área externa del tubing con el fin de abarcar la totalidad del área de contacto que hay entre la hornilla y el tubo de conducción del crudo, garantizando un flujo de calor uniforme.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**6.1.3 Lámina de protección.** Parte esencial en la preservación estructural de la hornilla, es la lámina de acero galvanizado que contendrá todos los componentes de la hornilla. A su vez, evita que el aislante se vea comprometido por factores de tipo mecánico o químico tales como aceites, grasas, tierra, etc. Esto es lo que recomienda el proveedor FIBER GLASS COLOMBIA S.A con tal de evitar daños en el aislante que se emplea en la sección 6.1.1.1 del presente documento.

Este recubrimiento metálico, debe estar instalado en toda la sección de hornilla propuesta como lo muestra la figura 47.

Figura 47. Distribución de los componentes del sistema de calentamiento



Fuente: Los autores.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

El material del que estará constituida la lámina de protección es acero galvanizado en caliente. Esta lamina será de calibre 16 (1,52 mm de espesor) considerando que el esfuerzo mecánico que vaya a sufrir la hornilla no es significativo. En la figura 48 se puede visualizar cómo es la apariencia de este producto.

Figura 48. Lámina de acero galvanizado para proteger el aislante térmico de la hornilla

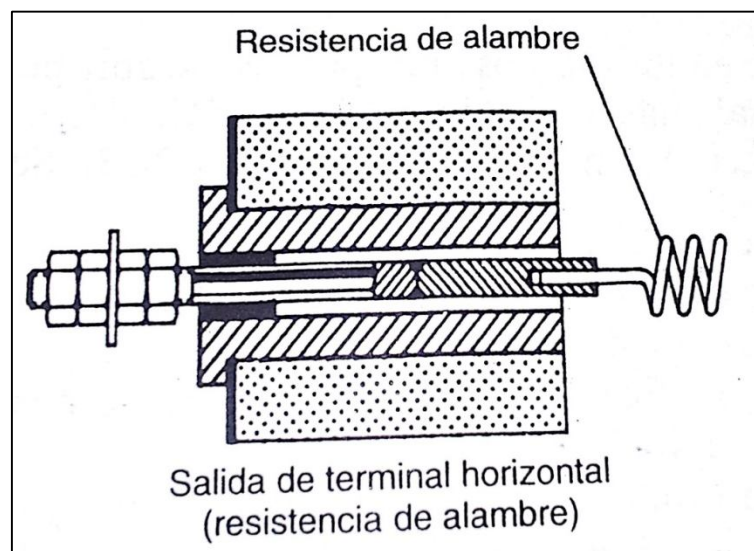


Fuente: Los autores.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**6.1.4 Conectores resistencia de calentamiento-cable de potencia.** La tarea de estos conectores, es proporcionar una unión tanto eléctrica como mecánica entre las resistencias de calentamiento y los cables de potencia que alimentan la hornilla. Se recomienda que el material del que estén hechos dichos conectores, sea de menor calidad que el de la resistencia. Ya que la resistencia tendrá una composición 80 Ni-20 Cr, los conectores serán 40 Ni-20Cr ó 20 Ni-25 Cr [24]. En la figura 49 se puede evidenciar los detalles de dicho terminal.

Figura 49. Conector resistencia eléctrica-cable de potencia



Fuente: [24].

La caída de tensión que se presenta en el terminal de conexión (analizando el caso más desfavorable que corresponde al de la hornilla 1) según [24], viene dada por la

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

ecuación (53). En donde “d” corresponde a 3 veces el diámetro de la resistencia calculada. Es decir  $d= 3 \times 1 = 3 \text{ mm}$ .

$$\Delta V = 0,5 \frac{I}{d^2} = 0,5 \times \frac{5,6}{3^2} = 0,311 \text{ V} \quad (53)$$

Dónde:

$\Delta V$ = Caída de tensión.

I= Corriente de carga.

d= Diámetro del conector.

## 6.2 CABLES DE POTENCIA

Las características en cuanto a calidad que deben tener los cables de potencia empleados en la alimentación de la hornilla, son de suprema importancia en la confiabilidad y eficiencia del sistema de calentamiento propuesto en el presente proyecto. Estos conductores eléctricos están sometidos a ambientes de pozo cuya atmósfera es corrosiva y con niveles de temperatura que pueden poner en riesgo todo el sistema. Este cable debe tener protección contra fluidos corrosivos y condiciones de fondo severas y además en algunos casos, debe soportar temperaturas altas de hasta 450°F.

Es por esto que se hará uso de los conductores que se emplean en el bombeo electrosumergible<sup>29</sup> (modulares) cuyas características de diseño cumplen con lo exigido en este tipo de ambientes corrosivos (fondo de pozo).

---

<sup>29</sup> Sistema artificial de recuperación de hidrocarburo que es compuesto por una bomba centrífuga en fondo de pozo accionada por un motor eléctrico.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

**6.2.1 Selección de tipo de cable según recubrimiento aislante.** Existen básicamente 2 tipos de diseño en cuanto a la forma modular<sup>30</sup> que pueden tener estos conductores:

- ✓ Configuración redonda.
- ✓ Configuración plana.

Estos conductores tienen un diseño particular en cuanto al tipo de recubrimiento que deben tener. Las partes esenciales de éstos son [25]:

- ✓ Conductor.
- ✓ Aislamiento.
- ✓ Barrera.
- ✓ Chaqueta.
- ✓ Armadura.
- ✓ Capilar de inyección.

- **Conductor.** El cable ESP<sup>31</sup> está compuesto por tres conductores de cobre que pueden ser sólido, trenzado y compacto. [26]

a) **Sólido:** Es un alambre de diámetro pequeño y de bajo costo tiene bajo estrés interfacial eléctrico (ver figura 50).

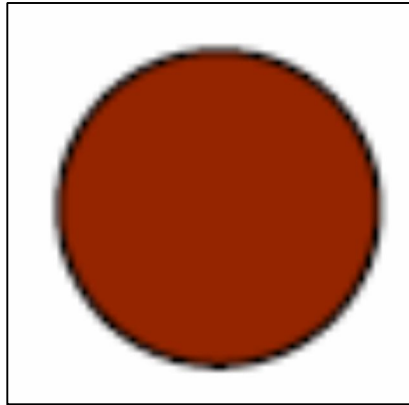
---

<sup>30</sup> Conductores juntos envueltos por un mismo recubrimiento.

<sup>31</sup> Cable empleado en la alimentación de bombas electrosumergibles.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

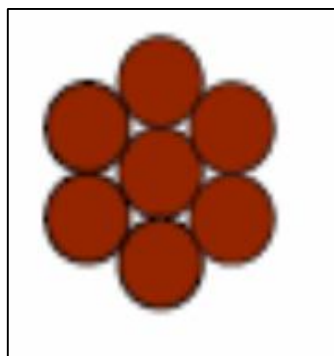
Figura 50. Conductor sólido



Fuente: [26].

b) Trenzado: Este cable es bastante flexible y tiene mayor resistencia ante daños mecánicos (ver figura 51).

Figura 51. Conductor trenzado

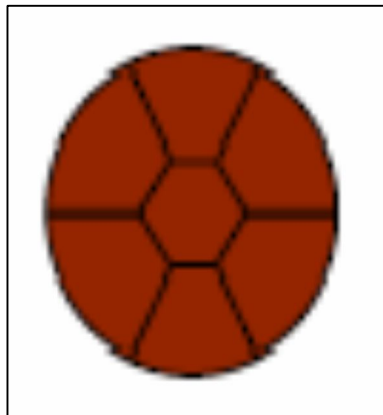


Fuente: [26].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- c) Compacto: Este cable tiene hasta una reducción del 10% en diámetro con respecto al cable conductor trenzado (ver figura 52).

Figura 52. Conductor compacto



Fuente: [26].

- **Aislamiento.** Cada conductor está aislado individualmente. Este aislamiento está unido mecánicamente al conductor. El aislamiento se debe escoger con base en las siguientes características de operación [25]:
  - ✓ Temperatura de operación.
  - ✓ Cambios de presión.
  - ✓ Relación gas petróleo (GOR).
  - ✓ Ataque por dióxido de carbono.
  - ✓ Ataque por petróleo.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- **Barrera.** Los conductores pueden tener, adicionalmente, una barrera protectora o una malla aplicada sobre dichos cables. Ésta actúa como protección mecánica. La barrera se escoge de acuerdo con los siguientes criterios [25]:

- ✓ Temperatura.
- ✓ Ambiente químico.
- ✓ Gas.
- ✓ Manejo de fluidos corrosivos.

- **Chaqueta.** Encima de la barrera está colocada una chaqueta que sostiene los tres conductores (fases) juntos y provee una protección química a la barrera. Esta chaqueta se escoge de acuerdo con las siguientes características:

- ✓ Temperatura.
- ✓ Ambiente químico.
- ✓ Gas.
- ✓ Condiciones de manejo.

- **Armadura.** Es un material galvanizado que se encuentra localizado sobre la chaqueta y se utiliza como protección mecánica al conjunto de componentes. Esta armadura se debe escoger con base en:

- ✓ Resistencia al daño.
- ✓ Resistencia a la corrosión.






Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- **Capilar de inyección.** Las industrias actualmente desarrollan cables que pueden llevar uno o dos tubos capilares, que facilitan la inyección de productos químicos como anticorrosivos, diluyentes, antiespumantes, etc. Éstos provenientes de la parte superior del pozo.

En la tabla 14 se tiene un resumen dado por [25] sobre las partes que componen comúnmente los conductores utilizados en bombas electro-sumergibles. Cabe resaltar una vez más que dependiendo el uso del conductor, se escogerán las especificaciones de su recubrimiento.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 14. Nomenclatura de cable modular

	Componente	Abreviación	Material
	Tipo y tamaño del conductor	#/sólido	AWG#/conductor sólido
		#/trenzado	AWG#/conductor trenzado
		#/compacto trenzado	AWG#/conductor trenzado compacto
	Aislante	PPE	Copolímero de polipropileno
		P	Copolímero de polietileno
		E	Caucho EPDM
		K	Película de Kapton
		T	Cinta semiconductora
		S	Especial
	Barrera	S	PVDF extruido o resina Solef
		TB_300	Película de fluoruro de Polivilino
		F	Fluoropolímero extruido
		TB_400	Cinta de alta temperatura patentada y trenza
		L	Plomo
	Chaqueta	PE	Polietileno de alta densidad
		O	Formulación de caucho nitrilo resistente al aceite
		E	caucho EPDM
	Armadura	#	Espesor
		G	Acero galvanizado
		HG	Acero galvanizado pesado
		GG	Doble capa de acero galvanizado
		SS	Acero inoxidable
		M	Aleación de Monel
Cable de tensión y armadura	Cable de tensión y armadura	3,4,5,6	Tensión nominal, kV
		F	Perfil cable
		R	Cable redondo

Fuente: [25].

El proveedor [25] presenta referencias de cables cuyas características varían dependiendo de la aplicación. A continuación se resumen las más relevantes en la tabla 15.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

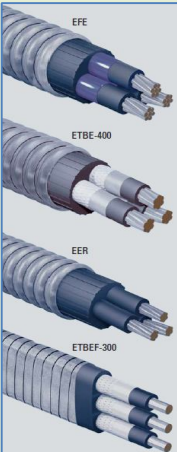

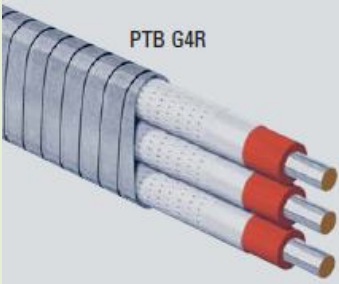
Tabla 15. Tipos de conductores usados para energizar bombas electrosumergibles

Tipo de conductor según recubrimiento		Descripción
Polietileno		<p>Fabricados sin blindaje. Su chaqueta está hecha de un compuesto de polietileno. Utilización en pozos de agua. Su temperatura máxima de uso es 82,22°C.</p>
Redalene		<p>Fabricados con un aislamiento de polipropileno (P o PPE), y chaqueta de nitrilo resistente al aceite (O); Incluye protección contra la corrosión de los conductores de cobre, contiene aislamiento patentado para resistencia al daño químico temperatura máxima que pueden soportar estos conductores es de 96,1°C, y la temperatura mínima para su manipulación e instalación es de -7,2°C.</p>
Redahot		<p>Aislamiento EPDM (E) y chaqueta de nitrilo resistente al aceite (O). Incluye recubrimiento de aleación de protección contra la corrosión, ofrece opciones de blindaje para resistir daños mecánicos. Los rangos de temperatura en que se utilizan estos cables están entre 104,4°C a 176,67°C.</p>

Fuente: [25].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 15. (Continuación).

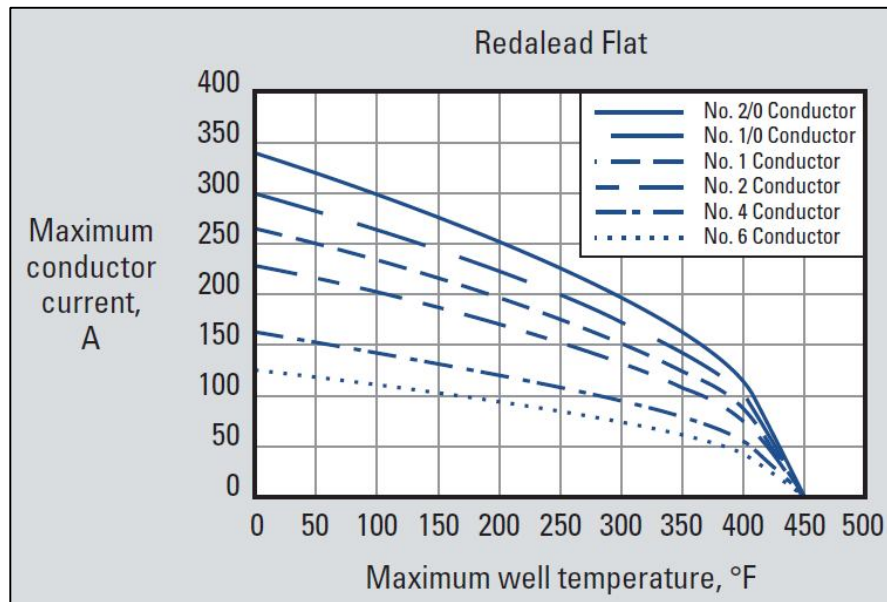
Tipo de conductor según recubrimiento	Descripción	
Redablack		<p>Emplean aislamiento y chaqueta EPDM (E). El recubrimiento lo protege contra la corrosión, contiene barreras para evitar fallos de ataques químicos, utiliza los compuestos de la chaqueta para incrementar las propiedades físicas y capacidades de temperatura. Se emplean en pozos con altas temperaturas, entornos hostiles o altas relaciones gas/petróleo. Su rango de operación es para temperaturas de 148,88°C o 204,4°C.</p>
Redalead		<p>Tienen aislamiento de EPDM (E) y un forro impenetrable de plomo (L), el rango de temperatura es de 204,4°C a 232,22°C.</p>
Redavalu		<p>Son alternativos al Redalene, su costo es menor y se puede utilizar en pozos con fluidos que no son agresivos y de temperaturas relativamente bajas, que no superen los 96,11°C.</p>

Fuente:[25]

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Con base en las características anteriormente expuestas para cada una de las referencias de cables, se hace la selección del cable a emplear en el calentamiento eléctrico teniendo en cuenta la temperatura de operación que deba soportar el cable y la protección mecánica del mismo. Este es **REDALEAD** referencia ELB (configuración plana<sup>32</sup>) ya que soporta temperaturas de 148.88 a 204.4°C. Además tiene revestimiento de aleación para protección anticorrosiva. Posee una barrera que contrarresta los ataques químicos, mecánicos y descompresión del gas que pueda estar presente en el pozo. En la figura 53 y tabla 16, se muestran más especificaciones para el conductor seleccionado.

Figura 53. Máxima corriente que puede soportar el conductor para diferentes temperaturas de operación



Fuente: [25].

<sup>32</sup> Tiendo en cuenta la reducción del espacio anular entre tubing y casing, conviene seleccionar conductor de configuración plana para disminuir las probabilidades de ruptura del mismo por estrangulamiento.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 16. Especificaciones técnicas de conductor seleccionado

Description	AWG Conductor Size/Type	Conductor Diameter, in. (mm)	Insulation Diameter, in. (mm)	Jacket Diameter, in. (mm)	Overall Dimensions, in. (mm)	Unit Weight, lbm/ft (kg/m)
(ELB) G4F <sup>†</sup>	1/stranded	0.328 [8.33]	0.464 [11.79]	0.544 [13.82]	0.669 × 1.757 [17.00 × 44.63]	2.37 [3.53]
	2/stranded	0.292 [7.42]	0.428 [10.87]	0.508 [12.90]	0.633 × 1.649 [16.08 × 41.88]	2.09 [3.11]
	4/solid	0.204 [5.18]	0.320 [8.13]	0.400 [10.16]	0.525 × 1.325 [13.34 × 33.66]	1.50 [2.23]
	6/solid	0.162 [4.11]	0.278 [7.06]	0.358 [9.09]	0.483 × 1.199 [12.27 × 30.45]	1.24 [1.85]
(ELB) G5F <sup>†</sup>	1/compacted	0.297 [7.54]	0.447 [11.35]	0.527 [13.39]	0.652 × 1.706 [16.56 × 43.33]	2.39 [3.56]
	2/compacted	0.268 [6.81]	0.418 [10.62]	0.498 [12.65]	0.623 × 1.619 [15.82 × 41.12]	2.02 [3.01]
	4/solid	0.204 [5.18]	0.354 [8.99]	0.434 [11.02]	0.559 × 1.427 [14.20 × 36.25]	1.62 [2.41]
(ELBE) G4R <sup>‡</sup>	1/stranded	0.328 [8.33]	0.464 [11.79]	1.345 [34.16]	1.515 [38.48]	2.85 [4.24]
	2/stranded	0.292 [7.42]	0.428 [10.87]	1.268 [32.21]	1.438 [36.52]	2.53 [3.77]
	4/solid	0.204 [5.18]	0.320 [8.13]	1.036 [26.31]	1.206 [30.63]	1.84 [2.74]
	6/solid	0.162 [4.11]	0.278 [7.06]	0.944 [23.98]	1.114 [28.30]	1.53 [2.28]
(ELBE) G5R <sup>‡</sup>	1/compacted	0.297 [7.54]	0.447 [11.35]	1.309 [33.25]	1.479 [37.57]	2.78 [4.14]
	2/compacted	0.268 [6.81]	0.418 [10.62]	1.246 [31.65]	1.416 [35.97]	2.49 [3.71]
	4/solid	0.204 [5.18]	0.354 [8.99]	1.109 [28.17]	1.279 [32.49]	1.99 [2.96]
(ELTB) G4F <sup>†</sup>	1/stranded	0.328 [8.33]	0.464 [11.79]	0.544 [13.82]	0.673 × 1.769 [17.09 × 44.93]	2.38 [3.54]
	2/stranded	0.292 [7.42]	0.428 [10.87]	0.508 [12.90]	0.637 × 1.661 [16.18 × 42.19]	2.10 [3.13]
	4/solid	0.204 [5.18]	0.320 [8.13]	0.400 [10.16]	0.529 × 1.337 [13.44 × 33.96]	1.50 [2.23]
	6/solid	0.162 [4.11]	0.278 [7.06]	0.358 [9.09]	0.487 × 1.211 [12.37 × 30.76]	1.24 [1.85]

Notes: Dimensions are nominal.  
Weight tolerance is ±4 %.  
Materials and specifications are subject to change without notice.

<sup>†</sup> Tolerances, in. (mm): insulation, ±0.012 [0.305]; jacket, ±0.015 [0.381]; overall, minor: ± 0.020 [0.508], major: ± 0.045 [1.143]

<sup>‡</sup> Tolerances, in. (mm): insulation, ±0.012 [0.305]; jacket, ±0.030 [0.762]; overall, ±0.035 [0.889]

Fuente: [25].

**6.2.2 Calibre del conductor.** El calibre del conductor se selecciona con base en la corriente que ha de manejar la hornilla y, la caída de tensión máxima aceptable para carga concentrada (anexo D), por lo tanto el calibre seleccionado es:  
Calibre: N° 6 AWG, Cu sólido.

Finalmente, con base en lo expuesto en la sección 6.2.1, en la tabla 17 se resumen las características del conductor que alimenta cada una de las hornillas.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 17. Características del cable de potencia

Calibre del conductor	Referencia	Configuración
#6 Cu, AWG	REDALEAD, ELB	Plana

Fuente: Los autores.

### 6.3 FUENTE DE ENERGÍA

Una vez se ha desarrollado el análisis del comportamiento térmico del crudo al ser calentado el tubing, se tiene la noción de cuanta es la máxima disponibilidad de potencia con la que se debe contar en el equipo de calentamiento. A su vez, es recomendable que la fuente de alimentación en baja tensión sea netamente independiente de otros circuitos que estén presentes en el pozo con tal de dar confiabilidad al sistema de calentamiento ante posibles fallas en equipos presentes como lo es el bombeo mecánico del cual depende la producción del pozo. Para ello, se debe contar con un transformador trifásico que proporcione la potencia necesaria a la hornilla de calentamiento. Éste es seleccionado bajo ciertos criterios de diseño:

- Potencia<sup>33</sup>: 3870 VA.
- Niveles de tensión: 13,2kV/440<sup>34</sup>V.
- Frecuencia: 60Hz.

---

<sup>33</sup> Por criterios de diseño y teniendo en cuenta que la carga es netamente resistiva, la potencia Activa (kW) calculada en el análisis térmico se hace igual a la potencia Aparente (kVA).

<sup>34</sup> Nivel de tensión 1 normalizada (B.T) de tipo industrial.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Sabiendo que la potencia es 3870 VA, el transformador<sup>35</sup> normalizado que se selecciona es de 15 kVA. Este será autoprotegido conmutable<sup>36</sup> tipo intemperie en estructura sencilla [27].

**6.3.1 Protección de transformador trifásico.** Para la protección del transformador de 15 kVA seleccionado se tiene en cuenta lo descrito en [27] en cuanto a cortacircuitos<sup>37</sup> y dispositivos de protección contra sobretensión. Esto significa que los equipos que se empleen deben tener las características de la tabla 18.

---

<sup>35</sup> Se debe hacer uso de un transformador con tal de obtener el nivel de tensión de diseño seleccionado.

<sup>36</sup> Según lo estipulado en "NORMA PARA DISEÑO, CÁLCULO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN" ESSA E.S.P.

<sup>37</sup> En [29] se indica cual debe ser la capacidad en cuanto a corriente del fusible a seleccionar tipo K para la capacidad del transformador seleccionado.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Tabla 18. Parámetros para la selección de equipos de protección y maniobra en media tensión

Parámetros	Unidad	Cortacircuitos	Dispositivo de protección contra sobretensión
Tensión de servicio	kV	13,2	13,2
Tensión nominal	kV	15	12
Corriente nominal	A	100	-
Nivel básico de aislamiento BIL	kV	110	110
Tensión sostenida (1') 60 Hz	kV	36	36
Corriente de cortocircuito simétrica	kA	5	-
Corriente de cortocircuito asimétrica	kA	12,5	-
Capacidad nominal de descarga	-	-	10
Máxima tensión de cebado	kV	-	68
Factor de puesta a tierra	-	-	0,8
Factor de seguridad mínimo de aislamiento	-	-	1,4

Fuente: [27].

## 7. CONCLUSIONES

El cumplimiento del objetivo principal del presente proyecto resulta ser satisfactorio ya que se ha logrado obtener un modelo matemático que representa el comportamiento térmico del crudo al calentarse la tubería de producción. Esto bajo condiciones específicas de funcionamiento permitiendo evidenciar mediante simulación, que se logra garantizar que a lo largo del tubing no se presente el fenómeno de cristalización de parafinas. Todo lo anterior es posible, después de una fuerte investigación sobre el tema de transferencia de calor con tal de procurar que el modelo desarrollado sea congruente con las características reales de pozo

Esta herramienta de calentamiento (hornilla) muestra su competitividad frente a otras, si se tiene en cuenta la facilidad que proporciona en cuanto a construcción e instalación puesto que los componentes de ésta se pueden conseguir oportunamente y sin mayores complicaciones en el país. Además, los requerimientos energéticos son bastante menores frente a otros métodos de calentamiento de crudo existentes como son la inyección de vapor de agua, aceite caliente o combustión In Situ (en el yacimiento).

En cuanto a operación, ésta herramienta de calentamiento no requiere que se frene la producción del pozo cada vez que se requiera incrementar la temperatura del crudo ya que la instalación del equipo (hornilla) se realiza una sola vez. Evento que si se presenta con métodos de calentamiento tales como (por ejemplo) la combustión In Situ, en donde se debe parar la producción para poder inyectar aire. Posterior a esto, se bajan calentadores para iniciar la combustión. Este proceso demanda que se frene la producción reflejando sus efectos en la economía de quien explota el pozo.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

La diferencia de temperatura del crudo con la formación aumenta a medida que se esté más cerca de la superficie propiciando mayores pérdidas de temperatura en el crudo. Esto influye considerablemente en el valor de potencia requerida por las hornillas para garantizar que la temperatura del mismo a lo largo del tubo, se encuentre por encima de la de cristalización

Esto se aprecia en los resultados obtenidos a partir del modelo desarrollado en el presente trabajo de grado, ya que la ubicación estratégica sugerida de las hornillas, lleva a que el valor de la potencia consumida por la hornilla ubicada a 185 m sea similar a la que se encuentra al final del tubing.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

## **8. RECOMENDACIONES.**

Se recomienda plantear un prototipo a escala de la tubería de producción y el sistema de calentamiento propuesto en el presente documento, a fin de hacer una validación de los resultados obtenidos aquí por medio de la simulación.

Proponer el diseño de un sistema de control de inyección de corriente que optimice la entrega de potencia eléctrica a la hornilla con tal de mejorar la eficiencia del sistema de calentamiento teniendo como premisa que se garantice la no cristalización de parafinas y posterior precipitación.

Para posteriores estudios se recomienda estudiar las pérdidas de calor en las tuberías de superficie y de esta manera garantizar que en el transporte del crudo desde la cabeza del pozo hasta los tanques de almacenamiento no se precipiten parafinas realizando el calentamiento acorde en el tubing.

Realizar estudios de aplicación a pozos y crudos diferentes a los de Campo Escuela Colorado, especialmente crudos pesados y parafínicos en Colombia, ya que puede servir para mejorar la extracción.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] E. X. A. Gerardo Torres, “RENTABILIDAD DEL CAMPO QUIAMARE Y EL IMPACTO ECONÓMICO EN LA CONSTRUCCIÓN DE UNA LÍNEA DE BOMBEO COMO ALTERNATIVA AL USO DE VACUUMS,” Universidad Central de Venezuela, 2013.
- [2] R. Curtis, Carl;Kopper, “YACIMIENTOS DE PETRÓLEO PESADO.” Puerto La Cruz, Venezuela, p. 24, 2002.
- [3] O. L. Peña Galvis, “SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE (MODELADO DE LA TRANSFERENCIA DE CORRIENTE MEDIANTE TUBO DE PRODUCCIÓN),” Universidad Industrial de Santander, 2008.
- [4] U. A. Repositorio Institucional, “FLUIDOS VISCOSOS,” 2008. [Online]. Available: <http://rua.ua.es/dspace/simple-search?query=fluidos+viscosos>. [Accessed: 30-Jan-2014].
- [5] E. Ariza Leon, “DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE CRISTALIZACIÓN DE LAS PARAFINAS EN EL CRUDO DEL CAMPO COLORADO,” Universidad Industrial de Santander, 2008.
- [6] G. Technologies, “FUNCIONAMIENTO DEL NO-KALT®,” 2009. [Online]. Available: <http://www.global-arg.com/solucion-inmediata-no-kalt.html>. [Accessed: 05-Mar-2014].
- [7] C. A. Villabona Carvajal, “MEJORA DE LA MOVILIDAD DEL CRUDO PARAFÍNICO MEDIANTE CAMPOS MAGNÉTICOS,” Universidad Industrial de Santander, 2009.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- [8] L. J. Giraldo Santacoloma, "DISEÑO DE UN LABORATORIO DE COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE MANIZALES.," Universidad Nacional de Colombia de Manizales, 2005.
- [9] S. A. Pinzón, "EVALUACIÓN DE MÉTODOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES PARA LA REMEDIACIÓN E INHIBICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS EN POZOS DE PETRÓLEO," Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [10] SPE, "SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS." .
- [11] O. F. Morantes Delgado, "SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE (MODELADO DE LA CARA DEL POZO COMO IMPEDANCIA ELÉCTRICA)," Universidad Industrial de Santander, 2007.
- [12] G. Somogyi Doval, "ESTUDIO DE DIFERENTES ESQUEMAS DE CALENTAMIENTO DIELECTRICO PARA LA RECUPERACIÓN MEJORADA DE CRUDO," Universidad Central de Venezuela, 2004.
- [13] C. J. García Gómez, "SISTEMAS Y DISPOSITIVOS ESPECIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS PESADOS," Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [14] M. Monroy Barrios, "DISEÑO DEL COMPLETAMIENTO DE UN POZO QUE SE SOMETERÁ A ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO," Universidad Industrial de Santander, 2005.
- [15] D. Danilovic, "DEVICE FOR MORE EFFICIENT PRODUCTION OF HEAVY OIL." Serbia, p. 5, 2012.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- [16] P. Cappuccio, "DOWNHOLE ELECTRICAL HEATING IN HEAVY OIL RESERVOIRS," 2008, p. 28.
- [17] H. M. M. Villarreal Villarreal, Erika Johana; Moya Ramírez, "ANÁLISIS DE LOS FLUIDOS APLICADO A LOS HIDROCARBUROS EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO," Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [18] Y. A. Cengel, *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA UN ENFÓQUE PRÁCTICO*, 3rd ed. México: Del Bosque Alayon, Ricardo, 2007, p. 891.
- [19] D. P. Incropera, Frank P; De Witt, *FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR*, 4th ed. México, 1999, p. 912.
- [20] C. S. Hasam, A R; Kabir, *FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER IN WELLBORES*. Richardson, Texas, 2002, p. 181.
- [21] D. A. Alvarado, *RECUPERACIÓN TÉRMICA DE PETRÓLEO*. Caracas, Venezuela, 2002, p. 345.
- [22] J. A. Gómez Tejedor, *CUESTIONES Y PROBLEMAS DE ELECTROMAGNETISMO Y SEMICONDUCTORES*. Valencia, 1999, p. 393.
- [23] G. de Aragon, "PLATAFORMA EDUCATIVA ARAGONESA, DEMO EDUCATIVA CATEDU." .
- [24] J. Astigarraga Urquiza, *HORNOS INDUSTRIALES DE RESISTENCIAS*, 6th ed. España: McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A, 1995, p. 313.
- [25] Schlumberger, "REDA ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP TECHNOLOGY, ESP CATALOG." p. 548, 2007.
- [26] P. Ortega, "PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN DE UN EQUIPO DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA PRODUCIR EL POZO VHR 08 EN

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

EL CAMPO VÍCTOR HUGO RUALES,” Universidad Tecnológica Equinoccial, 2009.

- [27] E. de Santander, *NORMAS PARA CÁLCULO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN*. 2005, p. 165.
- [28] J. D. Marcos del Cano, “PROTOTIPO DE MÁQUINA FRIGORÍFICA LiBr/H<sub>2</sub>O DE DOBLE EFECTO CONDENSADA POR AIRE. SIMULACIÓN, OPTIMIZACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES,” Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería Industrial, 2008.
- [29] G. EPM, *FUSIBLES PARA PROTECCIÓN DE RAMALES Y TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN A INSTALAR EN POSTE*. 2011, p. 5.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

## BIBLIOGRAFÍA

C. A. Villabona Carvajal, "MEJORA DE LA MOVILIDAD DEL CRUDO PARAFÍNICO MEDIANTE CAMPOS MAGNÉTICOS," Universidad Industrial de Santander, 2009.

C. J. García Gómez, "SISTEMAS Y DISPOSITIVOS ESPECIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS PESADOS," Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.

C. S. Hasam, A R;Kabir, *FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER IN WELLBORES*. Richardson, Texas, 2002, p. 181.

D. A. Alvarado, *RECUPERACIÓN TÉRMICA DE PETRÓLEO*. Caracas, Venezuela, 2002, p. 345.

D. Danilovic, "DEVICE FOR MORE EFFICIENT PRODUCTION OF HEAVY OIL." Serbia, p. 5, 2012.

D. P. Incropera, Frank P;De Witt, *FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR*, 4th ed. México, 1999, p. 912.

E. Ariza Leon, "DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE CRISTALIZACIÓN DE LAS PARAFINAS EN EL CRUDO DEL CAMPO COLORADO," Universidad Industrial de Santander, 2008.

E. de Santander, *NORMAS PARA CÁLCULO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN*. 2005, p. 165.

E. X. A. Gerardo Torres, "RENTABILIDAD DEL CAMPO QUIAMARE Y EL IMPACTO ECONÓMICO EN LA CONSTRUCCIÓN DE UNA LÍNEA DE BOMBEO

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

COMO ALTERNATIVA AL USO DE VACUUMS,” Universidad Central de Venezuela, 2013.

G. de Aragon, “PLATAFORMA EDUCATIVA ARAGONESA, DEMO E-DUCATIVA CATEDU.” .

G. EPM, *FUSIBLES PARA PROTECCIÓN DE RAMALES Y TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN A INSTALAR EN POSTE*. 2011, p. 5.

G. Somogyi Doval, “ESTUDIO DE DIFERENTES ESQUEMAS DE CALENTAMIENTO DIELECTRICO PARA LA RECUPERACIÓN MEJORADA DE CRUDO,” Universidad Central de Venezuela, 2004.

G. Technologies, “FUNCIONAMIENTO DEL NO-KALT®,” 2009. [Online]. Available: <http://www.global-arg.com/solucion-inmediata-no-kalt.html>. [Accessed: 05-Mar-2014].

H. M. M. Villarreal Villarreal, Erika Johana;Moya Ramírez, “ANÁLISIS DE LOS FLUIDOS APLICADO A LOS HIDROCARBUROS EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO,” Universidad Industrial de Santander, 2012.

J. A. Gómez Tejedor, *CUESTIONES Y PROBLEMAS DE ELECTROMAGNETISMO Y SEMICONDUCTORES*. Valencia, 1999, p. 393.

J. Astigarraga Urquiza, *HORNOS INDUSTRIALES DE RESISTENCIAS*, 6th ed. España: McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A, 1995, p. 313.

J. D. Marcos del Cano, “PROTOTIPO DE MÁQUINA FRIGORÍFICA LiBr/H<sub>2</sub>O DE DOBLE EFECTO CONDENSADA POR AIRE. SIMULACIÓN, OPTIMIZACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES,” Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería Industrial, 2008.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

L. J. Giraldo Santacoloma, "DISEÑO DE UN LABORATORIO DE COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE MANIZALES.," Universidad Nacional de Colombia de Manizales, 2005.

M. Monroy Barrios, "DISEÑO DEL COMPLETAMIENTO DE UN POZO QUE SE SOMETERÁ A ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO," Universidad Industrial de Santander, 2005.

O. F. Morantes Delgado, "SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE (MODELADO DE LA CARA DEL POZO COMO IMPEDANCIA ELÉCTRICA)," Universidad Industrial de Santander, 2007.

O. L. Peña Galvis, "SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE (MODELADO DE LA TRANSFERENCIA DE CORRIENTE MEDIANTE TUBO DE PRODUCCIÓN)," Universidad Industrial de Santander, 2008.

P. Cappuccio, "DOWNHOLE ELECTRICAL HEATING IN HEAVY OIL RESERVOIRS," 2008, p. 28.

P. Ortega, "PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN DE UN EQUIPO DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA PRODUCIR EL POZO VHR 08 EN EL CAMPO VÍCTOR HUGO RUALES," Universidad Tecnológica Equinoccial, 2009.

R. Curtis, Carl;Kopper, "YACIMIENTOS DE PETRÓLEO PESADO." Puerto La Cruz, Venezuela, p. 24, 2002.

S. A. Pinzón, "EVALUACIÓN DE MÉTODOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES PARA LA REMEDIACIÓN E INHIBICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS EN POZOS DE PETRÓLEO," Universidad Industrial de Santander, 2006.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Schlumberger, "REDA ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP TECHNOLOGY, ESP CATALOG." p. 548, 2007.

SPE, "SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS." .

U. A. Repositorio Institucional, "FLUIDOS VISCOSOS," 2008. [Online]. Available: <http://rua.ua.es/dspace/simple-search?query=fluidos+viscosos>. [Accessed: 30-Jan-2014].

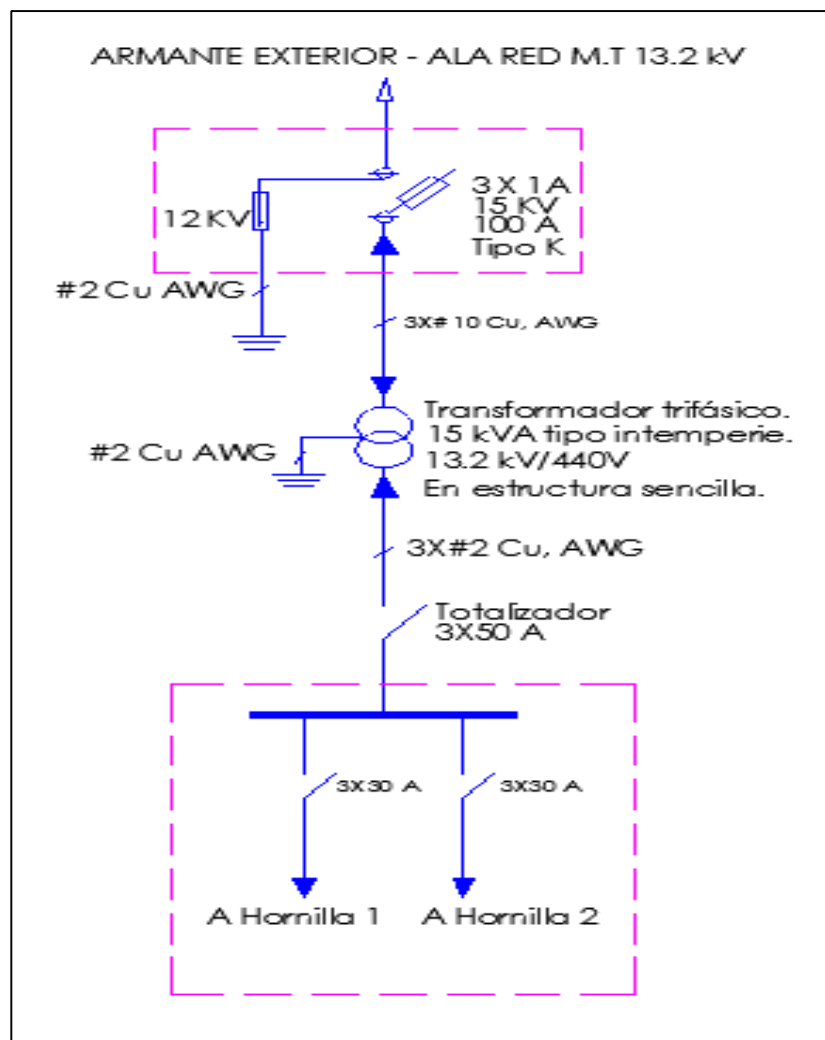
Y. A. Cengel, *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA UN ENFÓQUE PRÁCTICO*, 3rd ed. México: Del Bosque Alayon, Ricardo, 2007, p. 891.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

## ANEXOS.

### ANEXO A. Diagrama unifilar de sistema de calentamiento

Figura 54. Diagrama unifilar de sistema de calentamiento.



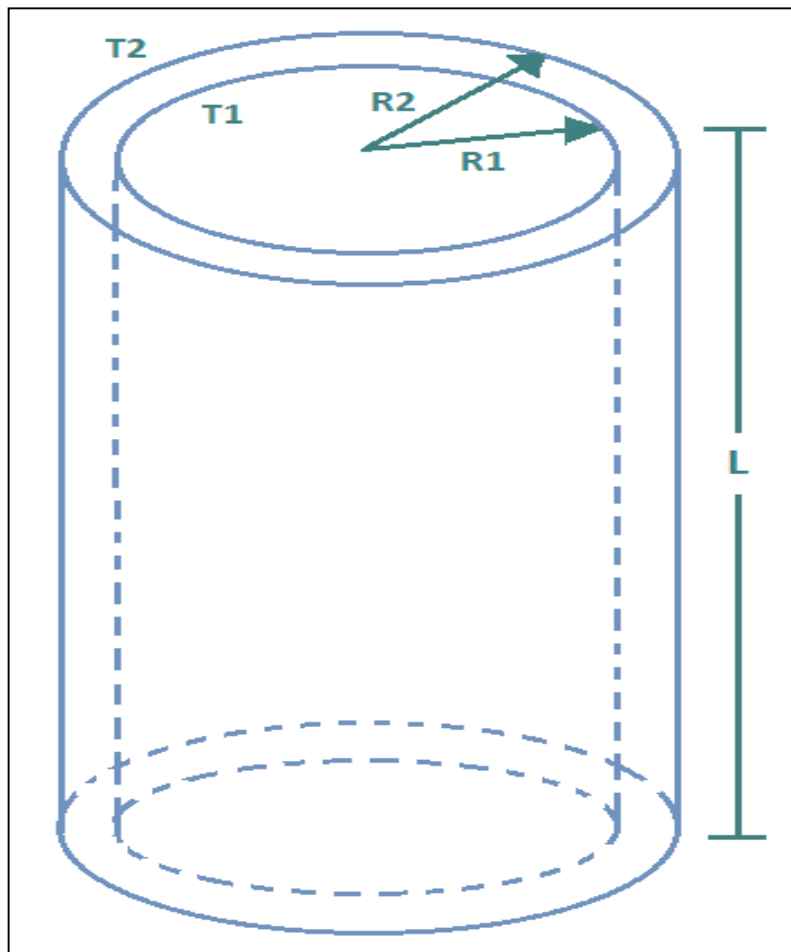
Fuente: Los autores.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

## ANEXO B. Modelo físico considerado para la tubería de producción

Para el análisis de esta transferencia de calor se considera el modelo gráfico de la figura 55.

Figura 55. Modelo físico considerado para la tubería de producción.



Fuente: Autores

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Dónde:

R1: Radio interno del tubo.

R2: Radio externo del tubo.

T1: Temperatura interna del tubo.

T2: Temperatura externa del tubo.

L: Longitud del tubo en [m].

$\dot{Q}$ : Transferencia de calor.

K: Conductividad térmica del material.

$$\dot{Q} = -2\pi rkL \frac{dT}{dr} \quad (54)$$

$$\left(\frac{\dot{Q}}{2\pi k}\right) \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = -L \int_{T_1}^{T_2} dT \quad (55)$$

$$\left(\frac{\dot{Q}}{2\pi k}\right) \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = -(T_2 - T_1) * L \quad (56)$$

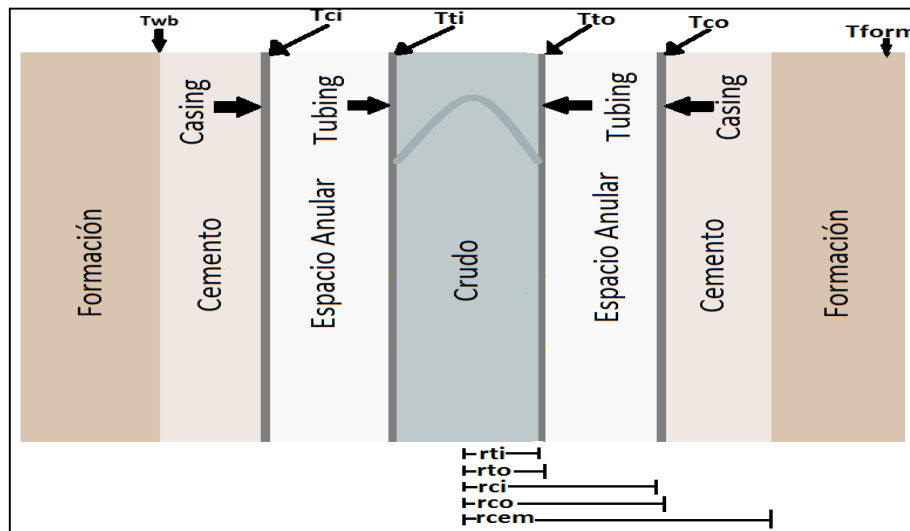
$$\dot{Q} = \frac{2\pi k(T_1 - T_2) * L}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (57)$$

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

### ANEXO C. Modelo matemático de los medios del pozo tratados como resistencias térmicas

A continuación se presenta el desarrollo matemático para calcular las pérdidas de calor que presenta el crudo cuando asciende por la tubería de extracción. Para esto se deben tener en cuenta las diferentes formas en que puede existir transferencia de calor, la geometría del sistema, y los materiales que lo constituyen (figura 56).

Figura 56. Espacio físico considerado en el modelado.



Fuente: Autores

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

rti: Radio interno del tubing [m]

rto: Radio externo del tubing [m]

rci: Radio interno del casing [m]

rco: Radio externo del casing [m]

rcem: Radio de la pared externa de cemento [m]

Tf: Temperatura del crudo °C.

Tti: Temperatura interna del tubing °C

Tt0: Temperatura externa del tubing °C

Tci: Temperatura interna del casing °C

Tco: Temperatura externa del casing °C

Twb: Temperatura de la pared externa de cemento, terreno en contacto con el cemento °C.

- La transferencia de calor por convección forzada entre el crudo y la superficie interna del tubing está dada por la ecuación (58):

$$d\dot{Q}_1 = 2\pi * r_{ti} * h_f * dz * (T_s - T_{ti}) \quad (58)$$

$$d\dot{Q}_1 = \frac{(T_s - T_{ti})}{\left(\frac{1}{2\pi * r_{ti} * h_f * dz}\right)} \quad (59)$$

$$R_{cr} = \left(\frac{1}{2\pi * r_{ti} * h_f * dz}\right) \quad (60)$$

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- La transferencia por conducción entre la superficie interna y externa del tubing, en este caso a través de las paredes de un cilindro, se muestra a continuación:

$$d\dot{Q}_2 = \frac{2\pi * Kt * dz * (T_{ti} - T_{to})}{\ln\left(\frac{r_{to}}{r_{ti}}\right)} \quad (61)$$

$$d\dot{Q}_2 = \frac{(T_{ti} - T_{to})}{\left(\frac{1}{2\pi * Kt * dz}\right) * \ln\left(\frac{r_{to}}{r_{ti}}\right)} \quad (62)$$

$$R_t = \left(\frac{1}{2\pi * kt * dz}\right) * \ln\left(\frac{r_{to}}{r_{ti}}\right) \quad (63)$$

- La transferencia de calor por radiación y convección entre la superficie externa del tubing y la superficie interna del casing está dada por la ecuación (64):

$$d\dot{Q}_3 = 2\pi * r_{to} * dz * (h_c + h_r) * (T_{to} - T_{ci}) \quad (64)$$

$$d\dot{Q}_3 = \frac{T_{to} - T_{ci}}{\left(\frac{1}{2\pi * r_{to} * dz * (h_c + h_r)}\right)} \quad (65)$$

$$R_{anular} = \frac{1}{2\pi * r_{to} * dz * (h_c + h_r)} \quad (66)$$

Donde  $h_c$  es coeficiente de transferencia de calor por convección y  $h_r$  el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

- La transferencia de calor por conducción entre la superficie interna del casing y la superficie externa de éste está dada por la ecuación (67):

$$d\dot{Q}_4 = \frac{T_{ci} - T_{co}}{\left(\frac{1}{2\pi * k_c * dz}\right) * \ln\left(\frac{r_{co}}{r_{ci}}\right)} \quad (67)$$

$$R_c = \left(\frac{1}{2\pi * k_c * dz}\right) * \ln\left(\frac{r_{co}}{r_{ci}}\right) \quad (68)$$

- Conducción de calor por la superficie interna del cemento y la superficie externa del cemento.

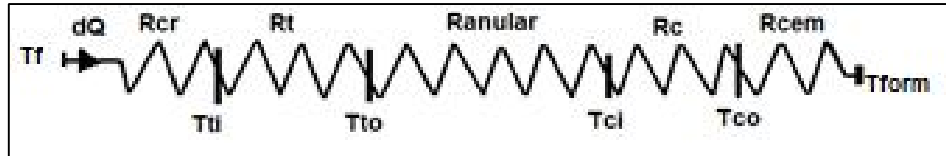
$$d\dot{Q}_5 = \frac{T_{co} - T_{terr}}{\left(\frac{1}{2\pi * k_c * dz}\right) * \ln\left(\frac{r_{cem}}{r_{co}}\right)} \quad (69)$$

$$R_{cem} = \left(\frac{1}{2\pi * k_c * dz}\right) * \ln\left(\frac{r_{cem}}{r_{co}}\right) \quad (70)$$

Al considerar la transferencia de calor en estado estable, se puede establecer una analogía con los circuitos eléctricos tal como se muestra en las figura 57. En donde la analogía con una fuente de tensión es la diferencia de temperaturas que hay entre el crudo y la formación. Provocando un flujo de calor análogo a la corriente eléctrica.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 57. Representación por resistencias térmicas de sistema crudo-tubing-espacio anular-casing-cemento.



Fuente: Los autores.

En donde:

$R_{cr}$ : Resistencia térmica del crudo.

$R_t$ : Resistencia térmica del tubing.

$R_{anular}$ : Resistencia térmica del espacio anular entre tubing y casing.

$R_c$ : Resistencia térmica del casing.

$R_{cem}$ : Resistencia térmica del cemento que recubre el pozo.

Entonces, como si fuera una corriente eléctrica, el calor fluye a través de cada resistencia térmica estando éstas en serie. La temperatura de la formación es una frontera térmica, luego:

$$d\dot{Q}_1 = d\dot{Q}_2 = d\dot{Q}_3 = d\dot{Q}_4 = d\dot{Q}_5 = d\dot{Q} \quad (71)$$

$$T_f - T_{form} = (T_f - T_{ti}) + (T_{ti} - T_{to}) + (T_{to} - T_{ci}) + (T_{ci} - T_{co}) + (T_{co} - T_{form}) \quad (72)$$

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Teniendo en cuenta las anteriores ecuaciones se pueden plantear una ecuación en la cual los cálculos de pérdidas de calor del crudo se pueda realizar considerando la temperatura del crudo en ascenso por la tubería y la temperatura de la superficie exterior del cemento, es decir:

$$d\dot{Q} = A * U_{to} * (T_f - T_{form}) \quad (73)$$

Dónde:

$d\dot{Q}$ : Tasa de pérdidas de calor [W]

A: área característica que usualmente coincide con alguna de las superficies a través de la cual se determinan las pérdidas de calor [m<sup>2</sup>].

$U_{to}$ : Coeficiente de transferencia de calor total,  $\left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K}\right]$ .

EL coeficiente de transferencia de calor total, se calcula mediante el siguiente desarrollo matemático:

$$T_f - T_{form} = d\dot{Q}1 \left[ \frac{1}{2\pi * r_{ti} * h_f * dz} \right] + d\dot{Q}2 \left[ \left( \frac{1}{2\pi * k_t * dz} \right) * \ln \left( \frac{r_{to}}{r_{ti}} \right) \right] + d\dot{Q}3 \left[ \frac{1}{2\pi * r_{to} * (h_c + h_r) * dz} \right] + d\dot{Q}4 \left[ \left( \frac{1}{2\pi * k_c * dz} \right) * \ln \left( \frac{r_{co}}{r_{ci}} \right) \right] + d\dot{Q}5 \left[ \left( \frac{1}{2\pi * k_{cem} * dz} \right) * \ln \left( \frac{r_{cem}}{r_{co}} \right) \right] \quad (74)$$

$$T_f - T_{form} = \frac{d\dot{Q}}{2\pi * dz} \left[ \frac{1}{r_{ti} * h_f} + \left( \frac{1}{k_t} \right) * \ln \left( \frac{r_{to}}{r_{ti}} \right) + \frac{1}{r_{to} * (h_c + h_r)} + \left( \frac{1}{k_c} \right) * \ln \left( \frac{r_{co}}{r_{ci}} \right) + \left( \frac{1}{k_{cem}} \right) * \ln \left( \frac{r_{cem}}{r_{co}} \right) \right] \quad (75)$$

$$d\dot{Q} = A * U_{to} * (T_f - T_{form}) \rightarrow (T_f - T_{form}) = \frac{d\dot{Q}}{A * U} \quad (76)$$

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

$$\frac{d\dot{Q}}{A \cdot U_{to}} = (T_f - T_{form}) = \frac{d\dot{Q}}{2\pi \cdot dz} * \left[ \frac{1}{r_{ti} \cdot hf} + \frac{\ln\left(\frac{r_{to}}{r_{ti}}\right)}{kt} + \frac{1}{r_{to} \cdot (hc + hr)} + \frac{\ln\left(\frac{r_{co}}{r_{ci}}\right)}{kc} + \frac{\ln\left(\frac{r_{cem}}{r_{co}}\right)}{k_{cem}} \right] \quad (77)$$

Al despejar de la ecuación el coeficiente de transferencia de calor total  $U_{to}$  y tomar como área común  $A = 2 * \pi * r_{to} * dz$  se tiene:

$$U_{to} = \frac{\left(\frac{d\dot{Q}}{A}\right)}{(T_f - T_{form})} = \frac{\left(\frac{d\dot{Q}}{2\pi \cdot r_{to} \cdot dz}\right)}{\left(\frac{d\dot{Q}}{2\pi \cdot dz}\right)} * \left[ \frac{1}{r_{ti} \cdot hf} + \frac{\ln\left(\frac{r_{to}}{r_{ti}}\right)}{kt} + \frac{1}{r_{to} \cdot (hc + hr)} + \frac{\ln\left(\frac{r_{co}}{r_{ci}}\right)}{Kc} + \frac{\ln\left(\frac{r_{cem}}{r_{co}}\right)}{k_{cem}} \right]^{-1} \quad (78)$$

Luego:

$$U_{to} = \frac{1}{r_{to}} * \left[ \frac{1}{r_{ti} \cdot hf} + \frac{\ln\left(\frac{r_{to}}{r_{ti}}\right)}{kt} + \frac{1}{r_{to} \cdot (hc + hr)} + \frac{\ln\left(\frac{r_{co}}{r_{ci}}\right)}{Kc} + \frac{\ln\left(\frac{r_{cem}}{r_{co}}\right)}{k_{cem}} \right]^{-1} \quad (79)$$

Siendo éste último (ecuación (79)) el coeficiente de transferencia de calor total es decir, que involucra todos los medios presentes en el pozo ( $U_{to}$ ).

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

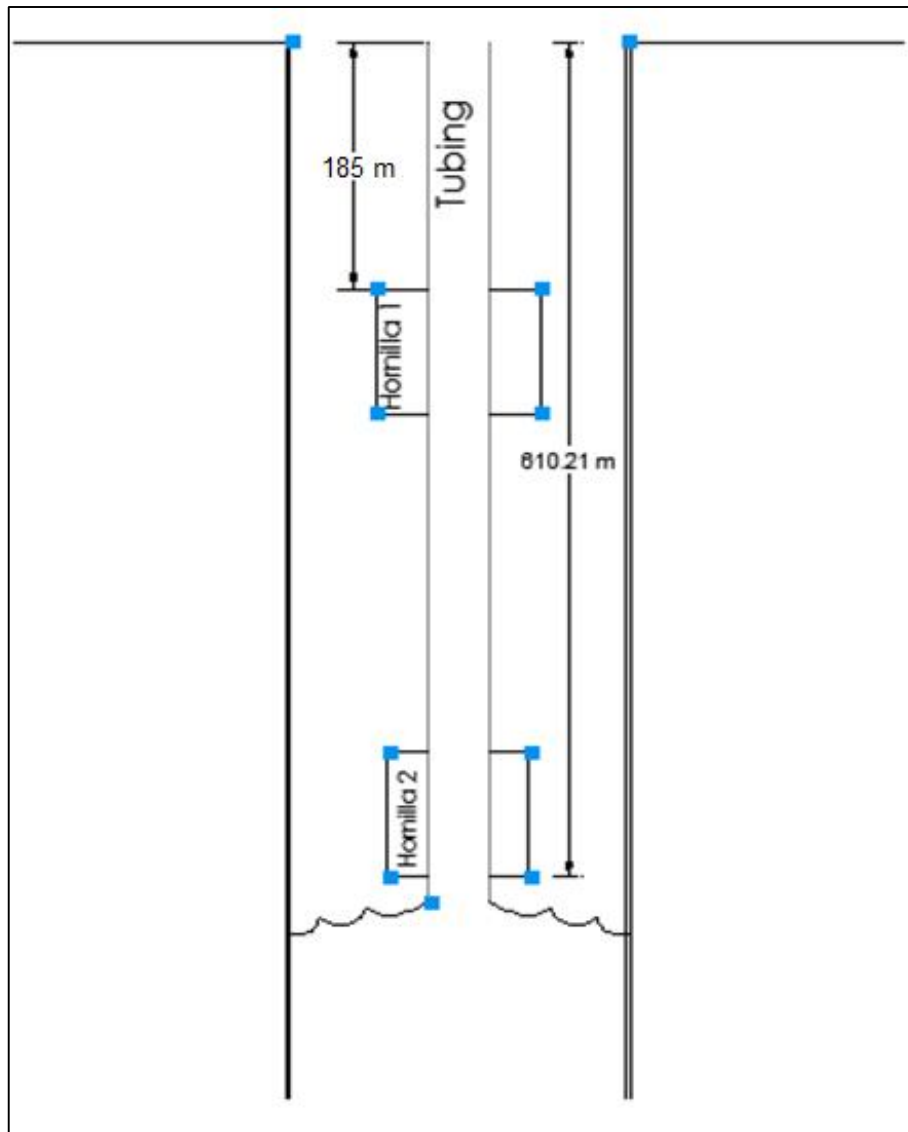
#### **ANEXO D. Cálculo del calibre del conductor que alimenta cada hornilla**

Para la correcta elección del conductor se debe tener en cuenta diversos factores como la temperatura máxima a la cual va a estar sometido, la capacidad amperimétrica, la regulación. La máxima temperatura que soportara el conductor, ocurre en la sección de la hornilla. Con base en [27] se calcula el conductor para una caída de tensión desde bornes de transformador no mayor a 3%.

Teniendo que la alimentación de las hornillas será un sistema trifásico se tiene que el calibre del conductor para la condición más desfavorable que es la que tiene la hornilla 2 tal como lo indica la figura 58 [27].

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Figura 58. Distribución de las hornillas calefactoras a lo largo del tubing.



Fuente: Los autores.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

Momento eléctrico es de  $M=3,870 \text{ kVA} * 610,21 \text{ m} = 2361,51 \text{ kVA} * \text{m}$

Tensión de línea de la hornilla  $V_L=440 \text{ [V]}$

$$\Delta V\% = \frac{K_g * F_c * M}{V_L^2}$$

$$3\% = \frac{K_{g\text{calculado}} * 1 * 2361,51}{440^2}$$

$$K_{g\text{calculado}} = 245,94$$

Para esta constante de regulación calculada se podría emplear un conductor (con factor de potencia igual a 1) calibre #6, luego de la figura 58 se escoge un conductor sólido de dicho calibre. Este mismo conductor seleccionado se debe emplear en la hornilla dos con el fin de manejar un solo estándar en cuanto al calibre.

En cuanto a la temperatura de operación del conductor, ésta está por encima de las que se pueden presentar en el fondo de pozo por lo tanto no se hace necesaria una corrección de corriente por temperatura.

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

## ANEXO E. Código en matlab para la solución del modelo en estado estable

A continuación se adjunta el código desarrollado con el programador de Matlab versión 2013, para resolver el modelo planteado en el presente trabajo de grado.

```
% Profundidad del pozo [m]
%Dato tomado de la tesis de Emiliano Ariza Leon,(fuente [5])
Profp=665.988
%Diámetro interno del tubing[m]
dti=0.055
rti=0.0275
%Diámetro externo del tubing[m]
dto=0.073
rto=0.0365
%Diámetro interno del casing[m]
dci=0.1534
rci=0.0767
%Diámetro externo del casing[m]
dco=0.1683
rco=0.08415
%Diámetro del revestimiento de cemento [m]
dcem=0.2445
rcem=0.12225

%calor específico del crudo[J/kg*K]
Cp=2000
%conductividad térmica del crudo[W/m*K]
Kp=0.17
%Densidad del crudo[kg/m^3]
Pp=780

%Calor específico del tubing y casing[J/kg*K]
Cc=460
Ct=Cc
%Conductividad térmica del tubing y casing [W/m*K]
Kc=50
Kt=Kc
%Densidad del tubing y casing [kg/m^3]
Pc=7850
Pt=Pc

%Conductividad térmica del cemento [W/m*K]
Kcem=0.346
```

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

```

%Producción de barriles diarios
barriles=10
%Producción de barriles por día [m^3/dia]
barril=10*159/1000
%Velocidad del crudo en ascenso por la tubería [m/s]
v=barril/(pi*0.0275*rti*24*3600)
%Flujo másico [Kg/s]
w=(1.59*780)/(24*3600)

%Temperatura de fondo de pozo [C]
%Dato tomado de tesis de emiliano ariza leon
Tp=38
%Temperatura ambiente [C]
%Tomada de internet
Tamb=27
%Gradiente geotermico [C/m]
gG=(Tp-Tamb)/Profp

%Cálculo para la primera hornilla
h=0.5
TfA(1)=32.22
TciA(1)=Tamb
n=1
m(n)=1
diff=10000
k=2
for k=2:1:185
while diff>0.1
TformA(k-1)=Tp-(Profp-((k-2)*2*h))*gG
%Constante de Boltzman [W/m^2*K^4]
b=5.67*10^(-8)
%Emisividad de la superficie interna del tubig y casing [-]
Eto=0.9
Eci=Eto
%Emisividad del anular [-]
E=((1/Eto)+(rto/rci)*((1/Eci)-1))
%Coeficiente de radiación del anular [-]
hr=b*(E^(-1))*((TfA(k-1))^2+(TciA(k-1))^2)*((TfA(k-1))+(TciA(k-1)))

TA(((TfA(k-1)+TciA(k-1))/2)*(9/5))+32
%Conductividad térmica del aire [W/m*K]
Ka=(1055.056*1.8/(3600*0.3048))*(0.01328 + ((2.471*(10^(-5))))*TA) -
((4.247*(10^(-9))))*(TA^2))
%Viscosidad del aire [Kg/m*s]
ua=(0.45359/(0.3048*3600))*(0.04 + ((6.155*(10^(-5))))*TA) - (1.22*(10^(-8)))*(TA^2))
%Calor específico del aire [J/kg*K]
Ca=(1055.056*1.8/(0.45359))*(0.2382 + ((1.39*(10^(-5))))*TA) +
(1.027*(10^(-8)))*(TA^2))
%Densidad del aire [Kg/m^3]

```

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

```

Pa=(0.45359/((0.3048)^3))*(8.55865*(10^(-2)) - ((1.5531*(10^(-4)))*TA) +
(1.65602*(10^(-7))*(TA^2)) - (6.92225*(10^(-11))*(TA^3))
%Coeficiente de expansion del aire [1/K]
Ba=(1.8)*(2.15844*(10^(-3)) - ((3.89367*(10^(-6)))*TA) + (4.12773*(10^(-
9))*(TA^2)) - (1.71867*(10^(-12))*(TA^3))
%Gravedad [m/s^2]
g=9.8
%Numero de Prandtl[-]
Pr=(Ca*ua)/(Ka)

%Coeficiente de convección [W/m^2*K]
hc=0.1*((dci/dto)^0.15)*(((Pa^2)*Ba*g*(TfA(k-1)-TciA(k-
1)))/((ua)^2))^0.3)*(Ka)*(dto^(-0.1))*((Pr)^(0.3))

%Coeficiente de transferencia general [W/m^2*K]
Uto=(1/rto)*(((log(rto/rti)/Kt)+(1/(rto*(hc+hr)))+(log(rco/rci)/Kc)+(log(
rcem/rco)/Kcem))^(-1))

    dQ=2*pi*rto*Uto*(2*h)*(TfA(k-1)-TformA(k-1))
    TcicalA(k-1)=((log(rci/rto)*dQ)/(2*pi*Kcem*2*h)) + TformA(k-1)
    diff=abs(TcicalA(k-1)-TciA(k-1))
    TciA(k-1)=(TcicalA(k-1)+TciA(k-1))/2
end
    TfA(k)=2*h*((g/Cp)+(1/Cp)*((dQ/(2*h*w)-g)))+ TfA(k-1)
    TciA(k)=TciA(k-1)
    diff=15000
    n=n+1
m(n)=n+1
end
    plot(m,TfA,'g')
hold on
%Temperatura del crudo a 200[m] de la superficie, tomado de Emiliano
Ariza Leon,(fuente [5])
TFFA=29.53
    Qhornilla1=w*Cp*(TfA(185)-TFFA)

pause

%Cálculo para la segunda hornilla
h=0.5
TfB(1)=32.22
TciB(1)=Tamb
p=1
r=186
q(p)=186
diff=10000
k=2
for k=2:1:415
while diff>0.1
TformB(k-1)=Tp-(Profp-(((k+185)-2)*2*h))*gG
%Constante de Boltzman [W/m^2*K^4]
b=5.67*10^(-8)

```

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

```

%Emisividad de la superficie interna del tubig y casing [-]
Eto=0.9
Eci=Eto
%Emisividad del anular [-]
E=((1/Eto)+(rto/rci)*((1/Eci)-1))
%Coeficiente de radiación del anular
hr=b*(E^(-1))*((TfB(k-1))^2+(TciB(k-1))^2)*((TfB(k-1))+(TciB(k-1)))

TB(((TfB(k-1)+TciB(k-1))/2)*(9/5))+32
%Conductividad térmica del aire [W/m*K]
Ka=(1055.056*1.8/(3600*0.3048))*(0.01328 + ((2.471*(10^(-5)))*TB) -
((4.247*(10^(-9)))*(TB^2)))
%Viscosidad del aire [kg/m*s]
ua=(0.45359/(0.3048*3600))*(0.04 + ((6.155*(10^(-5)))*TB) - (1.22*(10^(-
8))*(TB^2)))
%Calor específico del aire [J/kg*K]
Ca=(1055.056*1.8/(0.45359))*(0.2382 + ((1.39*(10^(-5)))*TB) +
(1.027*(10^(-8))*(TB^2)))
%Densidad del aire [Kg/m^3]
Pa=(0.45359/((0.3048)^3))*(8.55865*(10^(-2)) - ((1.5531*(10^(-4)))*TB) +
(1.65602*(10^(-7))*(TB^2)) - (6.92225*(10^(-11))*(TB^3)))
%Coeficiente de expansión del aire [1/K]
Ba=(1.8)*(2.15844*(10^(-3)) - ((3.89367*(10^(-6)))*TB) + (4.12773*(10^(-
9))*(TB^2)) - (1.71867*(10^(-12))*(TB^3)))
%Gravedad [m/s^2]
g=9.8
%Numero de prandtl[-]
Pr=(Ca*ua)/(Ka)

%Coeficiente de convección [W/m^2*K]
hc=0.1*((dci/dto)^0.15)*(((Pa^2)*Ba*g*(TfB(k-1)-TciB(k-
1)))/((ua)^2))^0.3)*(Ka)*(dto^(-0.1))*((Pr)^0.3)

%Coeficiente de transferencia general [W/m^2*K]
Uto=(1/rto)*(((log(rto/rti)/Kt)+(1/(rto*(hc+hr)))+(log(rco/rci)/Kc)+(log(
rcem/rco)/Kcem))^(-1))

dQ=2*pi*rto*Uto*(2*h)*(TfB(k-1)-TformB(k-1))
TcicalB(k-1)=((log(rci/rto)*dQ)/(2*pi*Kcem*2*h)) + TformB(k-1)
diff=abs(TcicalB(k-1)-TciB(k-1))
TciB(k-1)=(TcicalB(k-1)+TciB(k-1))/2

end

TfB(k)=2*h*((g/Cp)+(1/Cp)*((dQ/(2*h*w)-g)))+ TfB(k-1)
TciB(k)=TciB(k-1)
diff=15000
p=p+1
r=r+1
q(p)=r+1
end
plot(q,TfB, 'b')

```

Modelado y simulación del comportamiento del crudo al calentarse el tubo de conducción aprovechando el efecto Joule: Hornilla.

```
grid on
xlabel('Profundidad [m]')
ylabel('Temperatura [°C]')
title('Temperatura del crudo al calentarse con dos hornillas')

%Temperatura del crudo al final del tubing Emiliano Ariza Leon,(fuente
[5])
TFFB=38
Qhornilla2=w*Cp*(TfB(415)-TFFB)

hold on

Tcrist=32.22*ones(1,600);
x=1:1:600;
plot(x,Tcrist,'r')
axis([0 610 0 170])
```