

**MODELAMIENTO DEL PERFIL DE TEMPERATURA EN UN PROCESO DE  
CALENTAMIENTO ELÉCTRICO POR NODOS RESISTIVOS EN FONDO EN UN  
POZO DEL CAMPO COLORADO**

**JHON ALEXANDER BARRERA MARÍN  
DIEGO ARMANDO ACEVEDO MEDINA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2013**

**MODELAMIENTO DEL PERFIL DE TEMPERATURA EN UN PROCESO DE  
CALENTAMIENTO ELÉCTRICO POR NODOS RESISTIVOS EN FONDO EN UN  
POZO DEL CAMPO COLORADO**

**JHON ALEXANDER BARRERA MARÍN  
DIEGO ARMANDO ACEVEDO MEDINA**

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de  
**INGENIERO DE PETROLEOS**

**DIRECTOR  
JULIO CÉSAR PÉREZ ANGÚLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este trabajo quieren expresar sus más sinceros agradecimientos:

Al ingeniero JULIO CESAR PEREZ ANGULO por brindarnos la oportunidad de trabajar junto a él en este proyecto y por su apoyo y colaboración en todo momento, y por motivarnos a realizar el mejor esfuerzo para la realización de este trabajo.

Al CAMPO ESCUELA COLORADO por su colaboración, apoyo y confianza para realizar este trabajo.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER por ser nuestro hogar por tanto tiempo y constructor de nuestra formación profesional.

A todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido con que este sueño se haga realidad.

## DEDICATORIA

*A Dios por darme la oportunidad y la fuerza de alcanzar este logro y ser quien soy.*

*A mis padres, Jose Ignacio y Maria Elena por el apoyo, el cariño y la fuerza que me transmitieron a lo largo de mi carrera y mi vida. Esto es para ustedes y por ustedes.*

*A mis hermanos, Yesid, Jerson y Oscar, porque queriendo seguir sus pasos, y siendo ejemplo también, me impulsaron a ser quien soy. Gracias por su apoyo, amistad y consejos siempre. Y a mis queridos sobrinos, la hermosa Angie y al europeo Mikel, los amo.*

*Al resto de familia, mopris, tios, cuñadas, mi nona Kika, este logro también va para ustedes.*

*A mi hermosa Adriana, quien me acompañó toda la carrera y siempre me apoyó y me impulsó a lograr esta meta. Tu amor único e incondicional fue el motor que me hizo llegar a lo que soy.*

*A mi compañero de tesis, Jhonba, hermano de diferente madre, que con este trabajo finalizamos un sueño, muchísimas gracias por su apoyo y por estar ahí siempre.*

*A mi otro hermano, Camilo, chato gracias por poder contar con usted siempre, su amistad es única.*

*A mis amigos Diegol, Patiño, Boyaco, Vanesa, Ponti, Clarita, Dani, y tantos más, con quien construimos momentos inolvidables y siempre nos apoyamos mutuamente para salir adelante.*

**DIEGO**

## DEDICATORIA

*A Dios al guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades y permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida.*

*A mi madre Claudia por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles. Me ha dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos. Igualmente a mi padrastro quien me ha acompañado durante todo mi trayecto estudiantil y de vida.*

*A mi hermano por estar siempre presente, por ser esa persona que me impulsa por seguir adelante y ser mi motivación para alcanzar mis metas.*

*A mi abuela Hercilia, quien como una segunda madre influyó con su sabiduría, cuidados y cariño en la consecución de todos los logros de mi vida. De igual forma a toda mi familia tíos, primos quienes siempre me han brindado su apoyo.*

*A mi compañero de tesis, Diego, quien más que un amigo es un hermano, un apoyo constante durante estos cinco años de estudio. Gracias por su amistad y apoyo constante.*

*A mi gran amigo Camilo, hermano del alma, gracias por su amistad, experiencias vividas y apoyo durante los distintos momentos en la carrera.*

*A mis amigos Maria Clara, Patiño, Diegol, David, Mafe, Vannesa, Marilyn, Daniela, Karen, con quienes he compartido grandes momentos y experiencias durante estos años de estudio. Hemos creado un lazo que perdurará por mucho tiempo.*

**JHON**

## TABLA DE CONTENIDO

**Pág.**

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>18</b>
<b>1. ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....</b>	<b>19</b>
1.1 CALOR.....	19
1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR .....	19
1.3 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....	20
1.3.1 Transferencia de Calor por Conducción .....	22
1.3.2 Transferencia de Calor por Convección.....	30
1.3.3 Transferencia de Calor por Radiación .....	32
<b>2. FUNDAMENTOS DEL CALENTAMIENTO ELECTRICO RESISTIVO .....</b>	<b>35</b>
2.1 CALENTAMIENTO DE ALTA FRECUENCIA .....	36
2.2 CALENTAMIENTO INDUCTIVO.....	38
2.3 CALENTAMIENTO ELECTRICO RESISTIVO .....	39
2.3.1 Ventajas y desventajas del calentamiento eléctrico resistivo frente otras técnicas de recuperación térmica .....	41
2.4 CONDUCCIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA A TRAVÉS DEL MEDIO POROSO .....	43
2.5 TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA EN CALOR.....	47
2.5.1 Configuración de Calentamiento eléctrico resistivo .....	50
2.6 PARAMETROS QUE AFECTAN EL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO.....	51
2.6.1 Ley de Archie .....	55
<b>3. MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO.....</b>	<b>57</b>
3.1 GENERALIDADES CAMPO ESCUELA COLORADO .....	57
3.1.1 UBICACIÓN .....	58

3.1.2 ANTECEDENTES HISTORICOS.....	58
3.2 SELECCIÓN DEL POZO CANDIDATO PARA EL PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO .....	62
3.2.1 Consideraciones de diseño de pozos que serán estimulados con Calentamiento Eléctrico .....	62
3.2.2 Aplicación de criterios para la selección del pozo candidato a Calentamiento Eléctrico Resistivo.....	68
3.3 GENERALIDADES DEL SIMULADOR DE PROCESOS TÉRMICOS STARS	73
3.3.1 SIMULACION NUMERICA EMPLEANDO STARS .....	73
3.3.1.1 CONSTRUCCION DEL GRID.....	74
3.3.2 CARACTERÍSTICAS DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO DEL SIMULADOR STARS.....	84
4. RADIO CALENTADO DEL POZO PRODUCTO DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO .....	89
4. 1 FACTORES QUE AFECTAN EL RADIO CALENTADO.....	89
4.2 SENSIBILIZACION DEL RADIO CALENTADO .....	91
4.2.1 Efecto en el Perfil de Temperatura .....	92
4.2.2 Efecto en la Saturación de Agua respecto a la temperatura, en los bloques cercanos al pozo.....	100
4.2.3 Efecto en la Viscosidad respecto a la temperatura, en los bloques más cercanos al electrodo.....	102
4.2.4 Efecto en la producción acumulada del pozo.....	104
4.3 SELECCIÓN DEL MODELO PARA CÁLCULO DEL DUTY Y COSTO DE LA ENERGIA EMPLEADA .....	106
4.3.1 Duty de Calor .....	109
4.3.2 Costo de la Energía .....	112
4.3.3 Movilidad.....	112
5. EFECTO DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO SOBRE LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS EN LA ZONA CALENTADA .....	113
5.1 GENERALIDADES DE LAS PARAFINAS.....	113
5.2 PROPIEDADES DE LAS PARAFINAS .....	114
5.2.1 Punto de Cristalización .....	114

5.2.2 Punto de fluidez .....	114
5.2.3 Contenido de parafina.....	115
5.3 PROBLEMAS DE PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS EN EL CAMPO COLORADO .....	115
5.4 FACTORES QUE AFECTAN LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS.....	117
5.4.1 Temperatura .....	117
5.4.2 Presión.....	118
5.4.3 Peso Molecular y del Punto de fusión de la parafina .....	118
5.4.4 Naturaleza de la solución.....	118
5.5 UMBRAL DE PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS DEL CAMPO COLORADO .....	119
5.6 EFECTO DEL CAMBIO DE TEMPERATURA DEBIDO AL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO SOBRE LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS EN LA ZONA CALENTADA .....	121
6. CONCLUSIONES .....	124
7. RECOMENDACIONES.....	126
BIBLIOGRAFÍA.....	127
ANEXO .....	134

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1. Volumen elemental para el análisis de la conducción de calor unidimensional.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 2. Volumen elemental para análisis de conducción de calor tridimensional: 2a) coordenadas cartesianas; 3b) coordenadas cilíndricas; 3c) coordenadas esféricas. ....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 3. Esquema de un sistema de calentamiento por inducción .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 4. Suministro de energía a la formación a través de una fuente de alimentación. ....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 5. Conducción de la corriente eléctrica a través del agua intersticial. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 6. Esquemas típicos del calentamiento eléctrico resistivo. ....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 7. Configuración de Calentamiento eléctrico resistivo.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 8. Efecto del espesor adimensional del yacimiento (<math>h/rw</math>) sobre el perfil del poder de disipación. ....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 9. Efecto de la longitud adimensional del electrodo (<math>h_e/h</math>) sobre el perfil del poder de disipación. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 10. Efecto de la relación de resistividad de la formación sobre el perfil del poder de disipación.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 11. Ubicación geográfica del Campo Colorado en un mapa del departamento de Santander.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 12. Comportamiento histórico de producción promedio por día del Campo Colorado. ....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 13. Producción mensual de crudo Campo Colorado. ....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 14. Pérdidas de Calor en la formación durante el proceso de calentamiento eléctrico resistivo. ....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 15. Criterios de selección del pozo candidato. ....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 16. Menú Builder Simulador STARS.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 17. Construcción Grid.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 18. Propiedades del Grid.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 19. Creación de modelo del fluido.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 20. Curvas modelo del fluido. ....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 21. End points modelo roca-fluido. ....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 22. Curvas de Permeabilidad .....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 23. Cuadro Condiciones Iniciales.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 24. Cuadro arreglos Numéricos.....</b>	<b>82</b>

Figura 25. Eventos del pozo.....	83
Figura 26. Perforación y controles del pozo.....	84
Figura 27. Perfil de Temperatura en 2D con corte axial en dirección k. Modelo CE .....	93
Figura 28. Perfil de temperatura en 3D con corte axial en dirección k. Modelo CE.....	94
Figura 29. Perfil de temperatura al final de la simulación en Modelo CE. ....	95
Figura 30. Perfil de Temperatura en 2D corte axial en dirección k Modelo CEmax.....	96
Figura 31. Perfil de temperatura en 3D corte axial en dirección k Modelo CEmax.....	97
Figura 32. Perfil de temperatura al final de la simulación en Modelo CEmax. .....	98
Figura 33. Perfil de Temperatura en 2D corte axial en dirección k Modelo CEmin .....	99
Figura 34. Perfil de temperatura en 3D corte axial en dirección k Modelo CEmin .....	99
Figura 35. Perfil de temperatura al final de la simulación en Modelo CEmin .....	100
Figura 36. Saturación de agua contra tiempo y Temperatura para los tres casos: Modelo CE, Modelo CEmax, Modelo CEmin.....	101
Figura 37. Modelo de la viscosidad del fluido construido en el simulador.	103
Figura 38. Cambio en la viscosidad del crudo. ....	103
Figura 39. Producción acumulada a lo largo de 825 días. ....	105
Figura 40. Comparación producción acumulada .....	106
Figura 41. Comparación de viscosidad del crudo. ....	107
Figura 42. Factor de recobro.....	108
Figura 43. Temperatura bloque más cercano electrodo.....	110
Figura 44. Energía eléctrica total.....	111
Figura 45. Condiciones de precipitación parafinas .....	121
Figura 46. Envoltente de depositación de parafinas modelo calentado .....	123

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1. Pozos candidatos a seleccionar. ....</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 2. Características y Propiedades de la roca.....</b>	<b>76</b>
<b>Tabla 3. Propiedades de los componentes.....</b>	<b>77</b>
<b>Tabla 4. Valores de end points. ....</b>	<b>80</b>
<b>Tabla 5. Parámetros de aplicación de energía eléctrica a cada modelo. ....</b>	<b>92</b>
<b>Tabla 6. Variación en la viscosidad de los diferentes modelos.....</b>	<b>104</b>

# **TITULO** MODELAMIENTO DEL PERFIL DE TEMPERATURA EN UN PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO POR NODOS RESISTIVOS EN FONDO EN UN POZO DEL CAMPO COLORADO \*

**AUTORES** DIEGO ARMANDO ACEVEDO MEDINA \*\*

JHON ALEXANDER BARRERA MARIN \*\*

**PALABRAS CLAVES** Calentamiento eléctrico resistivo, transmisión de energía, calor, perfil de temperatura, viscosidad, calor, simulación de yacimientos.

## **RESUMEN**

El calentamiento eléctrico resistivo es un proceso de estimulación térmica basada en la aplicación de energía eléctrica al yacimiento. La transmisión de energía eléctrica se produce gracias al agua intersticial en el volumen poroso de la roca, creando un efecto de calentamiento en el radio cercano al pozo. Esto produce un aumento en la temperatura del yacimiento en la zona alterada mejorando la movilidad del crudo debido a la reducción de la viscosidad y ayudando a enfrentar otros problemas como la precipitación de parafinas. También esta técnica puede ser usada como un pre-calentador para una técnica de recobro secundario como la inyección de vapor o SAGD.

El objetivo de este trabajo fue simular el perfil de temperatura y radio de afectación en un pozo de campo colorado al ser sometido a un proceso de calentamiento eléctrico resistivo. Además se analizó las diferentes variables que toman papel en este proceso para realizar un estudio del comportamiento del perfil de temperatura, y señalando los problemas que podría presentar la mala aplicación del proceso de calentamiento eléctrico resistivo.

Para ello se utilizó la herramienta de simulación de CMG, con su simulador de procesos térmicos STARS, haciendo un análisis del modelo de simulación y de las diferentes variables que toman lugar. Con esta se pudo comparar diferentes escenarios donde variables como la potencia, la corriente y el voltaje, crean un efecto en el perfil de temperatura del yacimiento. Además se analizó el efecto en propiedades como la viscosidad y su efecto en la producción del pozo.

Para finalizar, se realizó un estudio del efecto del calentamiento eléctrico en la prevención de la precipitación de parafinas en Campo Colorado comparando el perfil de temperatura con el umbral de precipitación de parafinas del campo.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Faculta de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director: Julio Cesar Pérez Angulo.

**TITLE** MODELING OF TEMPERATURE PROFILE FROM AN ELECTRIC HEATING PROCESS BY RESISTIVE NODES IN BOTTOM WELL IN COLORADO FIELD \*

**AUTHORS** DIEGO ARMANDO ACEVEDO MEDINA \*\*  
JHON ALEXANDER BARRERA MARIN \*\*

**KEYWORDS** Resistive Electrical Heating, Power transmission, heat, temperature profile, viscosity, heat reservoir simulation.

**ABSTRACT**

Resistive electrical heating is a thermal stimulation process based on the application of electrical energy to the reservoir. The transmission power occurs through the pore water in the pore volume of the rock, creating a warming effect in the near wellbore radius. This produce an increase in the temperature of the reservoir in the area altered improving the mobility of oil due to reduce viscosity and helping to address problems such as the precipitation of paraffins. This technique can also be used as a pre-heater for a secondary recovery technique such as steam injection or SADG.

The aim of this work was to simulate the temperature profile and affectation radius in a well in Colorado field when it is subject to a resistive electrical heating process. We also analyzed the different variables that take part in this process for a study of the behavior of the temperature profile and pointing out the problems that could present the misapplication of resistive electrical heating process.

We used the simulation tool CMG with its simulator of thermal process STARS, making a analysis of the simulation model and the different variables that take place. With this was possible to compare different scenarios where variables such as power, current and voltage, create all an effect on the temperature profile.

Finally, we conducted a study of the effect of electric heating in the prevention of precipitation of paraffins in Colorado field comparing the temperature profile with paraffin precipitation threshold of the field.

---

\* Undergraduate Project

\*\* Physiochemical Engineering Faculty, Petroleum School. Universidad Industrial de Santander, Principal: Julio Cesar Pérez Angulo.

## INTRODUCCIÓN

El Campo Escuela Colorado es un campo maduro con serios problemas de precipitación de parafinas, que han provocado serios problemas operaciones, reducción en la productividad de los pozos, aumentos en los costos de producción e incluso el cierre y abandono de muchos pozos.

Por este motivo a partir de la creación de un modelo característico del comportamiento del yacimiento se pretende analizar los efectos generados sobre el mismo al ser sometido a un proceso de Calentamiento Eléctrico Resistivo, determinando cómo es la variación del perfil de temperatura a los largo del radio de calentamiento y cómo este calentamiento puede lograr reducir la viscosidad de los fluidos presentes; con el objetivo de maximizar la producción de petróleo, y por tanto aumentar el factor de recobro; de igual forma se pretende evaluar que parámetros afectan el Calentamiento Eléctrico Resistivo y la viabilidad de aplicar un proceso usado generalmente para yacimiento pesados o bitumen en un campo con fluidos pocos viscosos y con alto grado API.

Por esto, se pretende con este trabajo, realizar un estudio de cómo afecta el calentamiento eléctrico a estos problemas y de la misma forma analizar el efecto del calentamiento sobre otros inconvenientes como la depositación de parafinas en la cercanía al pozo, y de esta manera determinar la factibilidad de aplicar este tipo de procesos en pozos del Campo Colorado, como un mecanismo prevención, control y remediación ante problemas de precipitación de parafinas.

La información de las propiedades de los fluidos y de la roca usadas durante este proyecto fue recopilada por medio de papers y tesis que se han realizado sobre el Campo Colorado. Información requerida para la elaboración de un modelo representativo de yacimiento a través de la herramienta de simulación CMG.

# **1. ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

## **1.1 CALOR**

El calor se puede definir como la energía que tiene un objeto debido al movimiento de sus átomos o moléculas. Especificada como la forma de energía entre diferentes cuerpos o distintas zonas de un mismo cuerpo que se encuentran a distintas temperaturas. En otras palabras, una interacción de energía es calor sólo si ocurre debido a una diferencia de temperatura. El flujo de calor desde el cuerpo de mayor temperatura hacia el cuerpo de menor temperatura, ocurriendo transferencia de calor hasta que ambos cuerpos se encuentren en equilibrio térmico<sup>1</sup>.

Con ello se quiere resaltar el hecho de que cuando un cuerpo absorbe calor no lo acumula en forma de tal, sino que lo transforma en otro tipo de energía, que puede llegar a ser energía cinética de sus partículas, energía eléctrica de corrientes que en él se originen o trabajo que realice al dilatarse. De esta manera no es posible decir nunca que un cuerpo “contiene calor”.

## **1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR**

La transferencia de calor es aquella ciencia que busca predecir la transferencia de energía que puede ocurrir entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La ciencia de la transferencia de calor no sólo trata de explicar cómo puede ser transferida la energía calorífica, sino también trata de predecir la rapidez a la que se realizará este intercambio bajo ciertas condiciones

---

<sup>1</sup> CENGEL, Yunus. THERMODYNAMIC, Sexta Edición, McGRAW-HILL,

especificadas. El hecho de que un régimen de transferencia de calor sea el objetivo deseado de un análisis, señala la diferencia entre la transferencia de calor y la termodinámica<sup>2</sup>.

La termodinámica se ocupa de sistemas en equilibrio; se puede utilizar para predecir la cantidad de energía requerida para pasar un sistema de un estado de equilibrio a otro; no puede usarse para predecir qué tan rápido se realizará un cambio, ya que el sistema no se encuentra en equilibrio durante el proceso. La transferencia de calor completa al primer y segundo principios de la termodinámica, al proporcionar reglas experimentales adicionales que se pueden utilizar para establecer rapidez de transferencia de energía. Tal como en la ciencia de la termodinámica, las reglas experimentales utilizadas como base del tema de la transferencia de energía son muy simples y se les puede ampliar con facilidad para que abarquen diversas situaciones prácticas.

### **1.3 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

Siempre que exista un gradiente de temperatura en un sistema, la energía fluye como calor. La transmisión ocurre desde la zona de alta temperatura (fuente) hasta la región de baja temperatura (receptor). La diferencia de temperatura entre la fuente y el receptor es la fuerza impulsora que hace posible la transferencia de calor. El calor siempre fluye del cuerpo caliente al cuerpo frío, buscando el equilibrio de temperaturas; una vez se alcance el equilibrio de temperaturas, la transferencia de calor finaliza<sup>3</sup>.

Existen tres distintos modos en los cuales el calor se puede propagar de una fuente a un receptor. Estos son: Conducción, Convección, Radiación.

---

<sup>2</sup> HOLMAN, J.P., Transferencia de Calor, Décima Edición, McGRAW-HILL, S.A.u. 1999.

<sup>3</sup> SANTOS, Nicolás. Transferencia e intercambiador de Calor. Especialización en Ingeniería de Gas, Cap. 1.

En la naturaleza se presentan muchas circunstancias en las que el calor fluye no por uno, sino por varios de estos mecanismos, actuando en forma simultánea. De esta forma, en ingeniería es trascendental conocer la forma cómo interactúan los distintas formas de transferencia de calor, debido a que en la práctica, cuando uno de los mecanismos domina cualitativamente, se pueden desprestigiar los otros mecanismos con el fin de obtener soluciones que puedan ser acertadas de una forma aproximada.

De igual forma, es importante que además de comprender que los modos de transferencia de calor juegan un papel importante en el proceso, determinar si ese proceso es estable o no. Cuando la rapidez del flujo de calor en un sistema no varía con el tiempo, la temperatura de cualquier punto no cambia y prevalecen condiciones en estado estable. Bajo las condiciones de estado estable, la rapidez del flujo de calor en cualquier punto del sistema debe ser igual a la rapidez con la que entra a dicho flujo y no puede tener lugar cambio de energía interna.

El flujo de calor en un sistema es transitorio o inestable, cuando las temperaturas de varios puntos del sistema cambian con el tiempo. Puesto que un cambio de la temperatura indica un cambio de energía interna, se concluye que una parte de la energía se almacena y la otra constituye un flujo de calor inestable. Los problemas de flujo de calor en estado inestable, son más complejos que aquellos en estado estable y con frecuencia pueden ser resueltos únicamente por métodos aproximados<sup>4</sup>.

Todos los procesos de transferencia de calor involucran una o más de estas formas:

---

<sup>4</sup> PADILLA, Pablo, SUAREZ, Edgar. "Tratamiento eléctrico experimental para el transporte de crudos pesados en oleoductos". Tesis de pregrado de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 1997.pag-39

### 1.3.1 Transferencia de Calor por Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor que **ocurre en cuerpos sólidos o rígidos**, y se debe a la agitación de electrones o moléculas dentro del cuerpo. Por ejemplo, si una tubería tiene un fluido caliente en su interior y un fluido en su parte exterior, el calor se transfiere a través de la pared del tubo de la pared del tubo por conducción. Las moléculas del sólido permanecen quietas, con respecto a las otras, pero el calor es transferido de una molécula a otra mediante el proceso de la conducción<sup>5</sup>.

Los fundamentos de conducción de calor se establecieron hace más de un siglo y se atribuyen generalmente a Fourier, el cual establece que: “La tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección”. La experiencia ha demostrado que cuando existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, hay una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la de baja temperatura y que la cantidad que fluye es directamente proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional a la resistencia que se aplica al sistema, tal como se muestra en la **ecuación 1**.

$$\text{Flujo} = \frac{\text{Potencial}}{\text{Resistencia}} \qquad \text{Ecuación 1}$$

La transferencia de energía podría realizarse por el choque elástico (por ejemplo en fluidos) o por difusión de los electrones rápidos desde la región de alta temperatura a la región de baja temperatura (por ejemplo en los metales). Independientemente del mecanismo exacto, que no está completamente entendido, el efecto observable de la conducción del calor es un equilibrio de temperaturas.

---

<sup>5</sup> ARNOLD, K., STEWART, Surface productions Operations: Design of Oil Handline System and Facilities. Volumen 2. Tercera Edición. Gulf Publishing Houston, Texas, 1999. Modificada.

La tasa de flujo de calor que se transfiere al sólido o a una pared es proporcional a la diferencia de temperatura a través del sólido y al área de transferencia de calor del sólido, e inversamente proporcional al espesor del sólido. La constante de proporcionalidad,  $k$ , se conoce como la conductividad térmica del sólido. De esta forma, la cantidad de flujo de calor que se transfiere al sólido o a una pared puede ser expresada por la **ecuación 2**:

$$q = - \frac{KA(\Delta T)}{L} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$q$ = Tasa de transferencia de calor, BTU/hr

$A$ = Área de transferencia de calor (área transversal al flujo de calor), pies<sup>2</sup>

$\Delta T$ = Diferencia de temperatura, °F

$K$ = Conductividad térmica, BTU/hr-ft-°F

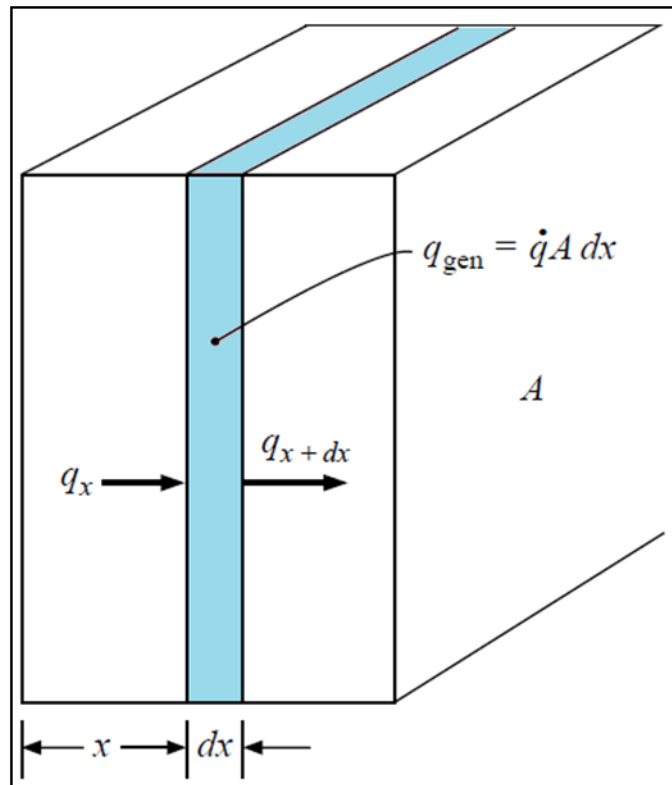
$L$ = Distancia que la energía es conducida, ft. Referida generalmente al espesor de pared del material.

El signo (-) es consecuencia del segundo principio de la termodinámica, según el cual el calor debe fluir hacia la zona de temperatura más baja.

El punto de partida es la **ecuación 2** con el fin de plantear el problema de establecer una ecuación básica que represente la transferencia de calor en un sólido. En la **Figura 1** se considera un sistema adimensional, si el sistema se encuentra en un estado estacionario, es decir, si la temperatura no varía con el tiempo, entonces el problema es sencillo y se requeriría sólo integrar la *Ecuación 2* y sustituir los valores adecuados para resolverla para la cantidad deseada, sin embargo, si ese no es el caso y la temperatura del sólido está variando con el tiempo, o dentro del sólido hay fuentes de calor, la situación es más complicada. Considerando el caso general en el que la temperatura está cambiando con el tiempo y dentro del cuerpo puede haber fuentes de calor, debido a que este va a

ser el comportamiento que se pretende modelar. Para el elemento de espesor  $dx$  se puede realizar el siguiente balance de energía:

**Figura 1. Volumen elemental para el análisis de la conducción de calor unidimensional.**



**FUENTE:** HOLMAN, J.P., *Transferencia de Calor*, Décima Edición, McGRAW-HILL, S.A.u. 1999.

Energía conducida en la cara izquierda + calor generado dentro del elemento = cambio en la energía interna + energía conducida fuera de la cara derecha.

Estas cantidades de energía están dadas de la siguiente forma:

$$\text{Energía en la cara izquierda} = q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\text{Energía generada dentro del elemento} = qA dx \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\text{Cambio en la energía interna} = \rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\begin{aligned} \text{Energía hacia fuera de la cara derecha} &= q_{x+dx} = -kA \int_{x+dx}^x \frac{\partial T}{\partial x} \\ &= A \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] \end{aligned} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde  $q$  =energía generada por unidad de volumen

$c$  = calor específico del material

$\rho$  = densidad

La combinación de los elementos expresados es:

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + qA dx = \rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} - A \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

o

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad \text{Ecuación 8}$$

La **ecuación 8**, es la ecuación de conducción de calor unidimensional. Para tratar más de un flujo de calor unidimensional, necesitando solo considerar el calor conducido hacia adentro y hacia afuera de un volumen unitario en las tres direcciones coordenadas, como se muestra en la **Figura 2a**. El balance de energía da:

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + \frac{dE}{d\tau} \quad \text{Ecuación 9}$$

Y las cantidades de energía están expresadas por:

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$q_{x+dx} = - \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy dz$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$q_{y+dy} = - \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dx dz$$

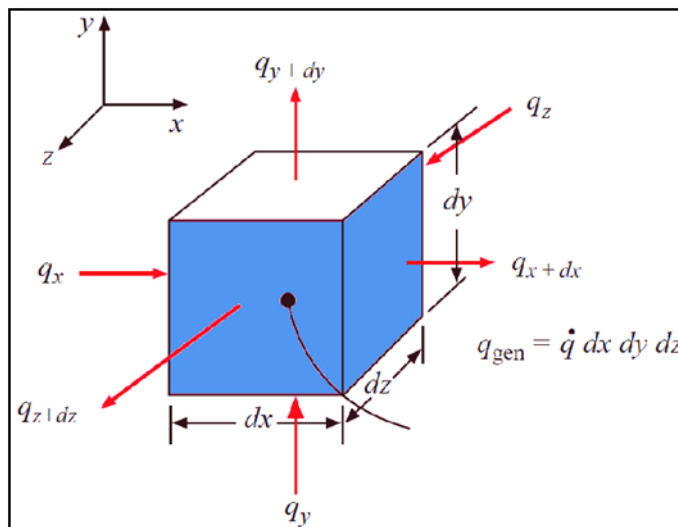
$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$q_{z+dz} = - \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dx dy$$

$$q_{gen} = q dx dy dz \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\frac{dE}{d\tau} = \rho c dx dy dz \frac{dT}{d\tau} \quad \text{Ecuación 14}$$

**Figura 2. Volumen elemental para análisis de conducción de calor tridimensional:** 2a) coordenadas cartesianas; 3b) coordenadas cilíndricas; 3c) coordenadas esféricas.



**FUENTE:** Figura 2a. HOLMAN, J.P., *Transferencia de Calor, Décima Edición, McGRAW-HILL, S.A.u. 1999.*

De manera que la ecuación general de conducción de calor tridimensional es

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{dT}{d\tau} \quad \text{Ecuación 15}$$

Si la conductividad térmica es constante la ecuación anterior se escribe:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{d\tau} \quad \text{Ecuación 16}$$

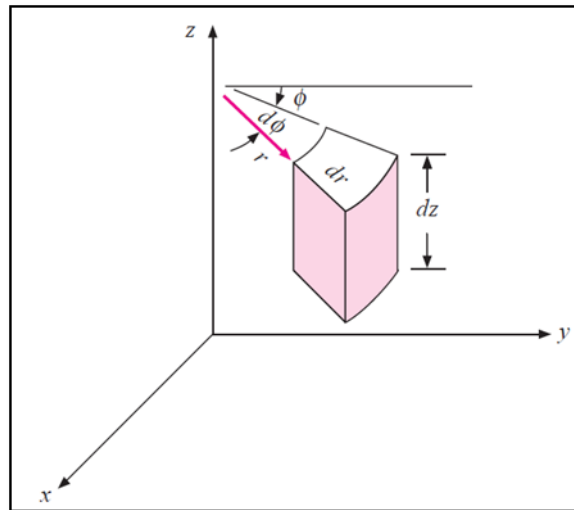
Donde la cantidad  $\alpha = k/\rho c$  se llama *difusividad* térmica del material. Cuanto mayor será el valor de  $\alpha$ , tanto más rápida será la difusión de calor a través del material. Un valor elevado de  $\alpha$  puede ser el resultado de un alto valor de conductividad térmica, que indicará una elevada rapidez de transferencia de energía o de un valor bajo de la capacidad calorífica  $\rho c$ . Un valor bajo de la capacidad calórica significará que se absorberá dentro del material una cantidad menor a la de la energía en movimiento y será utilizada para aumentar la temperatura del material; por tanto, habrá más energía disponible para transferencias ulteriores.

La ecuación 1.3a se puede transformar ya sea, en coordenadas cilíndricas o bien, en coordenadas esféricas por medio de técnicas de cálculo estándar. Los resultados son los siguientes:

#### **Coordenadas Cilíndricas:**

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{d\tau} \quad \text{Ecuación 17}$$

**Figura 2b. Coordenadas cilíndricas**

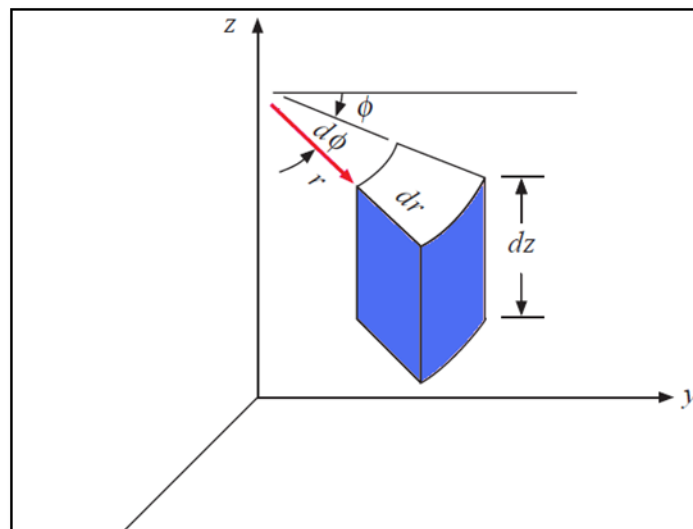


FUENTE: Figura 2b. HOLMAN, J.P., *Transferencia de Calor*, Décima Edición, McGRAW-HILL, S.A.u. 1999.

**Figura 2c. Coordenadas esféricas**

**Coordenadas Esféricas:**

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rT) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left( \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 (\sin \theta)^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} \quad \text{Ecuación 18}$$



FUENTE: Figura 2c. HOLMAN, J.P., *Transferencia de Calor*, Décima Edición, McGRAW-HILL, S.A.u. 1999.

- **Conducción unidimensional de calor en estado estable para cilindros huecos**

El flujo radial de calor por conducción a través de un cilindro hueco, es un problema unidimensional de conducción de gran importancia práctica. La conducción a lo largo de tubos y a través de aislamientos para tubos son ejemplos muy comunes. Si el cilindro es homogéneo y lo bastante largo para permitir pasar por altos los efectos en los extremo y si la temperatura de la superficie interior es contante  $T_i$  mientras la temperatura de la superficie exterior se mantiene uniforme en un valor  $T_0$  la rapidez de conducción de calor es a partir de la siguiente ecuación 19<sup>6</sup>.

$$q = -KA \frac{dT}{dr} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde  $\frac{dT}{dr}$  es igual al gradiente de temperatura en la dirección radial.

Para el cilindro hueco de la figura 1. El área está en función del radio, por lo cual:

$$A = 2\pi r l \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde  $r$  es el radio y  $l$  la longitud del cilindro. Por lo tanto, la rapidez del flujo de calor por conducción puede expresar como:

$$q = -K(2\pi r l) \frac{dT}{dr} \quad \text{Ecuación 21}$$

Separando variables e integrando entre  $T_0$  para  $r_0$  y  $T_i$  para  $r_i$  se obtiene:

$$T_0 - T_i = \frac{q}{2\pi K l} \ln \left( \frac{r_0}{r_i} \right) \quad \text{Ecuación 22}$$

Despejando  $q$  de la ecuación se obtiene:

$$q = \frac{T_0 - T_i}{\frac{\ln \left( \frac{r_0}{r_i} \right)}{2\pi k l}} \quad \text{Ecuación 23}$$

---

<sup>6</sup> PADILLA, Juan Pablo. SUAREZ, Edgar Alberto. "Tratamiento eléctrico experimental para el transporte de crudos pesados en oleoductos".

Ecuación que permite para calcular la velocidad de conducción del calor a través de un cilindro hueco por ejemplo una tubería de producción.

### 1.3.2 Transferencia de Calor por Convección

La convección es la transferencia de calor dentro de un fluido como resultado de la mezcla y movimiento de porciones frías y calientes del mismo fluido. La convección **ocurre únicamente en fluidos (gases o líquidos)**. Éstos, al calentarse aumentan de volumen y, por lo tanto, disminuyen su densidad y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura. Por ejemplo, el aire en contacto con las placas calientes de un radiador en una habitación se eleva y el aire frío desciende al suelo de la habitación. La habitación es calentada y el aire frío se extrae de la habitación. Por tanto la habitación es calentada por convección. De esta forma, la mezcla de las partes más calientes y más frías de fluido son las que conduce el calor del radiador de un lado de la habitación a otro<sup>7</sup>.

La transferencia de energía por convección, desde una superficie cuya temperatura es superior a la del fluido que la rodea, se realiza en varias etapas. Primero, el calor fluirá por conducción desde la superficie hacia las partículas adyacentes del fluido. La energía así transferida servirá para incrementar la temperatura y la energía interna de esas partículas del fluido. Entonces, las partículas del fluido se moverán hacia una región del fluido con temperaturas más bajas, donde se mezclarán y transferirán una parte de su energía a otras partículas del fluido. El flujo, en este caso, es de fluido y de su energía<sup>8</sup>.

---

<sup>7</sup> ARNOLD, K., STEWART, Surface productions Operations: Design of Oil Handline System and Facilities. Volumen 2. Tercera Edición. Gulf Publishing Houston, Texas, 1999. Modificada.

<sup>8</sup> ARENAS, Naddia; ARTEAGA, Jaime. "SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN OLEODUCTO TRANSPORTADOR DE CRUDO PESADO SOMETIDO A CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO". Tesis de pregrado de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2013.

El término convección puede proporcionar una noción intuitiva sobre el proceso de transferencia de calor; no obstante, esta noción intuitiva deberá ser ampliada para que permita llegar a un tratamiento analítico adecuado del problema<sup>9</sup>.

Este tipo de transferencia de calor puede describirse mediante una ecuación similar a la ecuación de conducción. La rapidez de transferencia de calor está relacionada con la diferencia de temperatura total entre la pared y el fluido, y el área de la superficie  $A$ . A la cantidad  $h$  se le llama el *coeficiente de transferencia de calor por convección*. Para expresar el efecto total de la convección, se utiliza la ley de enfriamiento de Newton:

$$q = h A (\Delta T)$$

*Ecuación 24*

Donde:

$q$  = Tasa de transferencia de calor, BTU/hr

$A$  = Área de transferencia de calor, ft<sup>2</sup>

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura, °F

$h$  = Coeficiente de película, BTU/hr-ft<sup>2</sup>-°F

La constante de proporcionalidad,  $h$ , depende de la naturaleza del fluido y de la agitación, y se determina experimentalmente. Si la agitación no existe,  $h$  está solamente influenciada por la naturaleza del fluido y es llamada coeficiente de película. Para algunos sistemas se puede realizar un cálculo analítico de  $h$ . Para situaciones complejas se deberá determinar experimentalmente. En algunas situaciones se llama *Conductancia de Película* al coeficiente de transferencia de calor debido a su relación con el proceso de conducción en la delgada capa estacionaria de fluido sobre la superficie de la pared.

---

<sup>9</sup> SANTOS, Nicolás. Transferencia e intercambiador de Calor. Especialización en Ingeniería de Gas, Cap. 1.

La transferencia de calor por convección, además de su dependencia de las propiedades térmicas del fluido (conductividad térmica, calor específico, densidad), tendrá cierta dependencia de la viscosidad del fluido. Esto era de esperarse porque la viscosidad influye el perfil de velocidad y, de manera correspondiente, la rapidez de transferencia de energía en la región cercana a la pared<sup>10</sup>.

Existen dos tipos de transferencia de calor por convección: Natural y Forzada.

- **Convección Natural:** Es la que ocurre por movimiento de fluido debido a la diferencia de densidades resultantes del calentamiento o enfriamiento de éste a media que recibe o cede calor.
- **Convección Forzada:** Es la que ocurre por movimiento del fluido inducido por medios mecánicos como agitadores, bombas, compresores, etc. Por ejemplo, si se expusiera una placa caliente al aire ambiente de una habitación sin una fuente de movimiento externa, se experimentaría un movimiento del aire como resultado de los gradientes de densidad cerca de la placa. A esto le llamamos *convección natural* o libre, en oposición a la *convección forzada*, que ocurre en el caso en que el ventilador sopla aire sobre la placa. Los fenómenos de ebullición y condensación también se agrupan bajo el tema general de transferencia de calor por convección.

### 1.3.3 Transferencia de Calor por Radiación

En contraste con los mecanismos de conducción y convección, en donde está involucrada la transferencia de energía a través de un medio material, el calor también se puede transferir a regiones donde existe el vacío perfecto. En este

---

<sup>10</sup> HOLMAN, J.P., Transferencia de Calor, Décima Edición, McGRAW-HILL, S.A.u. 1999

caso, el mecanismo de transferencia **ocurre entre cuerpos por medio de ondas electromagnéticas**. Se limitara a explicar la radiación electromagnética que es propagada como resultado de una diferencia de temperaturas; a esto se le llama radiación térmica<sup>11</sup>.

Por ejemplo el sol transfiere energía a la tierra por medio de radiación. El fuego en un incendio es otro ejemplo de radiación. El fuego en un incendio, calienta el aire a su alrededor y por convección se calienta el resto de una habitación, en este caso el calor se transfiere tanto por convección como por radiación.

En la mayoría de procesos de transferencia de calor en campos de procesamiento de gas se usan procesos transferencia de calor por conducción o convección o la combinación de los dos. La transferencia de calor por radiación es muy poco usada en las facilidades de superficie de los campos petroleros. Sin embargo, la energía radiante es importante en el cálculo del calor emitido por la llamarada que ocurre en la tea.

Consideraciones termodinámicas muestran que un radiador ideal, o cuerpo negro, emitirá energía a una rapidez proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. Cuando dos cuerpos intercambian calor por radiación, el intercambio de calor neto es entonces proporcional a las diferencias en  $T^4$ . Así:

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \qquad \text{Ecuación 25}$$

Donde  $\sigma$  es la constante de proporcionalidad y se le llama constante de Stefan-Boltzmann A la Ecuación 1.5 se le llama la *ley de radiación térmica de Stefan-Boltzmann*, y se aplica sólo a los cuerpos negros. Es importante observar que esta

---

<sup>11</sup> ARNOLD, K., STEWART, Surface productions Operations: Design of Oil Handline System and Facilities. Volumen 2. Tercera Edición. Gulf Publishing Houston, Texas, 1999.

ecuación únicamente es válida para la radiación térmica; otros tipos de radiación electromagnética no pueden ser tratados de una manera tan simple.

Se ha mencionado que un cuerpo negro irradia energía de acuerdo con la ley  $T^4$ . A tales cuerpos les llamamos negros porque las superficies negras, tales como un pedazo de metal cubierto con carbón negro, se aproximan a este tipo de comportamiento. Otros tipos de superficies, como una brillante superficie pintada o una placa de metal pulida, no irradian tanta energía como un cuerpo negro; sin embargo, la radiación total emitida por estos cuerpos, por lo general, sigue la proporcionalidad de  $T^4$ . Para tomar en cuenta la naturaleza “gris” de estas superficies introducimos otro factor en la Ecuación 1.5, llamado emisividad  $\epsilon$ , que relaciona la radiación de la superficie “gris” con la de una superficie negra ideal.

Además, se debe tomar en cuenta el hecho de que no todas las radiaciones que dejan una superficie alcanzarán la otra superficie, ya que la radiación electromagnética viaja en línea recta y algunas se perderán en los alrededores. Por consiguiente, para tomar en cuenta ambas situaciones, se introducen dos nuevos factores a la ecuación anterior:

$$q = F_{\epsilon} F_G \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde  $F_{\epsilon}$  es la función de emisividad y  $F_G$  es la función geométrica de “factor de vista”. Los fenómenos de transferencia de calor por radiación pueden ser excesivamente complejos, y los cálculos son raras veces tan simples como lo sugiere la ecuación anterior.

## 2. FUNDAMENTOS DEL CALENTAMIENTO ELECTRICO RESISTIVO

Uno de los principales obstáculos en el recobro de aceite de gravedad API baja en yacimientos de aceite pesado y bitumen es la viscosidad. A pesar de que el recobro térmico es usualmente considerado uno de los más efectivos métodos para reducir la viscosidad, para algunos la introducción de calor al yacimiento por medio de métodos térmicos comúnmente implementados no es un proceso recomendado. Sin embargo para estos tipos de yacimientos, el calentamiento electromagnético es la solución recomendada. El calentamiento electromagnético se enfoca a un sector del yacimiento en lugar de calentar el yacimiento en su totalidad, lo cual significa que el área objetivo pueda ser calentada con mayor eficiencia y con pérdidas de calor mucho más bajas que con otros métodos térmicos<sup>12</sup>.

En el calentamiento electromagnético, la onda electromagnética es irradiada a partir de los electrodos sobre la formación que contiene el aceite. A medida que la onda electromagnética se propaga en la formación, fluidos y otros materiales del yacimiento impiden su paso proporcionando resistencia al flujo. Como resultado, la intensidad de la onda de propagación se reduce y la energía se convierte en calor<sup>13</sup>.

El término calentamiento electromagnético ha sido utilizado de forma indiscriminada por muchos de los promotores comerciales e investigadores de la tecnología electromagnética por igual. Es necesario que se establezca una diferencia entre los diversos procesos electromagnéticos en discusión.

---

<sup>12</sup> Albina Mukhametshina and Elena Martynova. "ELECTROMAGNETIC HEATING OF HEAVY OIL AND BITUMEN: A REVIEW OF EXPERIMENTAL STUDIES AND FIELD APPLICATIONS". Harold Vance Department of Petroleum Engineering, Texas A&M University, Moscow, Russia. Accepted 11 March 2013. Academic Editor: Jorge Ancheyta.

<sup>13</sup> Amit Chakma, U. of Calgary, and K.N. Jha, CANMET "HEAVY-OIL RECOVERY FROM THIN PAY ZONES BY ELECTROMAGNETIC HEATING". SPE 24817. Washington DC, 1992.

Teóricamente, la energía electromagnética es utilizada en cualquier momento en que uno pueda aplicar el término "electromagnético" en la descripción de la aplicación. La utilización de la energía eléctrica, por ejemplo, también puede ser descrita como electromagnética, donde la energía electromagnética se entrega a frecuencias bajas (50 Hz). En el otro extremo del espectro, los hornos de microondas que emplean frecuencias muy altas (2.450 MHz) también utilizan energía electromagnética.

De acuerdo con las mediciones de laboratorio, los hidrocarburos pesados pueden absorber la energía de las radio frecuencias (RF) y de las frecuencias microondas (MW) alcanzando temperaturas muy altas (300 a 400 °C) muy rápidamente como lo hace la inyección de vapor.

Existen diferencias fundamentales entre calentamiento de baja frecuencia y calentamiento de alta frecuencia. Por tanto, teniendo como parámetro de referencia la frecuencia de la corriente eléctrica empleada, el calentamiento electromagnético puede ser dividido en tres categorías:

- ❖ Calentamiento de alta frecuencia o Calentamiento Microondas
- ❖ Calentamiento de baja frecuencia o Calentamiento Eléctrico Resistivo
- ❖ Calentamiento Inductivo

## **2.1 CALENTAMIENTO DE ALTA FRECUENCIA**

El calentamiento de alta frecuencia, también conocido como calentamiento por RF, o calentamiento dieléctrico, es el proceso en el que una alternancia de alta frecuencia del campo eléctrico, o de ondas de radio o de radiación electromagnética de microondas calienta un material dieléctrico. A frecuencias más altas, este calentamiento es causado por la rotación del dipolo molecular dentro del dieléctrico.

Como se mencionaba anteriormente este proceso genera una alternancia en el campo eléctrico produciendo que los dipolos formados por las moléculas tiendan a alinearse con este campo eléctrico. Puesto que el campo eléctrico que acompaña la onda electromagnética cambia la dirección constantemente, genera un movimiento continuo de las moléculas polares las cuales aumentan su energía cinética. Al aumentar la energía cinética crece la agitación molecular y el número de colisiones entre moléculas vecinas aumenta generándose calor debido a la fricción que se presenta entre ellas<sup>14</sup>.

En tal caso, el calentamiento es instantáneo, independientemente de las características térmicas del medio y dependiente de la frecuencia utilizada, de la intensidad del campo eléctrico de excitación y de la permisividad del medio. Este cambio de campo eléctrico puede ser causado por una onda electromagnética que se propaga en el espacio libre, o puede ser causado por un campo eléctrico que alterna rápidamente dentro de un condensador.

En el calentamiento con radiofrecuencias se trabaja con una corriente alterna cuya frecuencia se encuentran en un rango de 10 a 100 MHz. Con longitudes de onda entre 30 y 3 metros, debido a esto su profundidad de penetración es reducida comparada con el calentamiento resistivo. Las microondas son ondas electromagnéticas que tienen frecuencia en el rango de 300 MHz a 300 GHz y tienen longitudes de onda que varían desde un metro hasta un milímetro.

A diferencia de otras técnicas de calentamiento electromagnético, con calentamiento a altas frecuencias se alcanzan mayores temperaturas aunque su radio de penetración en la formación es menor.

---

<sup>14</sup> WEB ACADEMIA. “El calentamiento dieléctrico, Mecanismo, Potencia, Penetración, El uso de campos eléctricos de RF en el calentamiento dieléctrico, El calentamiento por microondas”.  
[http://centrodeartigos.com/articulos-enciclopedicos/article\\_98312.html](http://centrodeartigos.com/articulos-enciclopedicos/article_98312.html)

## 2.2 CALENTAMIENTO INDUCTIVO

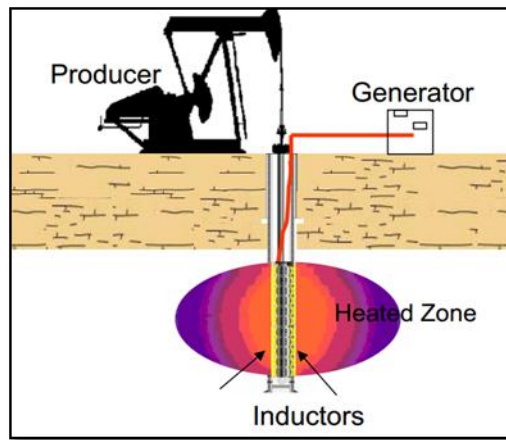
En el calentamiento inductivo la alternancia del flujo de corriente eléctrica a través de los conductores induce un campo magnético en el medio circundante. La alternancia del campo magnético causa corrientes secundarias, cuya circulación en el medio resulta en el calentamiento.

Esta herramienta se compone de un número de inductores que están conectados al fondo de la tubería de producción y posicionados frente a la zona de producción. El sistema utiliza el casing de producción como un elemento calentado inductivamente para conducir el calor en la zona de producción que rodea al pozo. A medida que el flujo de corriente pasa a través del conductor, se produce un campo electromagnético variable causante de la inducción de corrientes secundarias en el revestimiento. Una vez las corrientes van circulando a través del revestimiento se produce el calentamiento de este, debido a las pérdidas por histéresis y a la fricción intermolecular generada por el flujo de cargas. Debido a que entre el revestimiento y la formación que lo rodea se presenta una diferencia de temperaturas se genera un corriente de calor por conducción hacia la misma, haciendo que los fluidos intersticiales se calienten y por tanto fluyan con más facilidad. Es decir el calor es inducido en el revestimiento usando herramientas de inducción, sin la necesidad de presentarse flujo de corriente en el yacimiento. En la **figura N°2** se muestra el esquema de un sistema de calentamiento por inducción para un pozo vertical.

Generalmente en el método inductivo, la herramienta de inducción se ha montado posteriormente en un pozo existente y se coloca donde se ha determinado que el calentamiento será más beneficioso. La herramienta de inducción puede estar situada en la tubería de producción de un pozo para evitar la precipitación de ceras. O bien cuando se esté implementando un método de recuperación por cavidades progresivas puede estar cerca de la ingesta de la bomba de cavidad

progresiva de modo que la viscosidad del aceite se reduce y la bomba puede ser operada a una velocidad más alta. Asimismo, la herramienta de inducción puede ser ubicada adyacente a la formación de aceite pesado en donde un aumento en la temperatura del aceite puede tener un efecto dramático en la viscosidad del aceite y la productividad del pozo<sup>15</sup>.

**Figura 3. Esquema de un sistema de calentamiento por inducción**



**FUENTE:** Albina Mukhametshina “ELECTROMAGNETIC HEATING OF HEAVY OIL AND BITUMEN: A REVIEW OF EXPERIMENTAL STUDIES AND FIELD APPLICATIONS”. Harold Vance Department of Petroleum Engineering, Texas A&M University, Moscow, Russia, 2013.

### 2.3 CALENTAMIENTO ELECTRICO RESISTIVO<sup>16</sup>

El Calentamiento Eléctrico Resistivo (ERH) es una agresiva tecnología in situ de remediación térmica que fue desarrollada por el Departamento de Energía de EE.UU. para mejorar la tecnología de producción de petróleo in situ en suelos de baja permeabilidad. El suelo y las aguas subterráneas son calentados por el paso de corriente eléctrica a través la roca. En donde es la resistencia al flujo de la corriente eléctrica lo que resulta en el aumento de la temperatura del subsuelo. El

<sup>15</sup> ÇAĞDAŞ, ACAR. “ENHANCING PETROLEUM RECOVERY FROM HEAVY OIL FIELDS BY MICROWAVE HEATING”. Degree of Master of Science in Petroleum and natural gas engineering. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY. 2007.

<sup>16</sup> B.A.Baylor,J.B.Maggard,and R,A. Wattenbarg. Improved Calculation of Oil Production Response to Electrical Resistance Heating (ERH). SPE 20482. Texas, USA. 1990.

calentamiento eléctrico resistivo ocurre cuando un flujo de corriente eléctrica pasa a través del yacimiento y la energía eléctrica es convertida en calor. Debido a que la trayectoria eléctrica es proporcionada por el agua in situ, las temperaturas de formación deberán ser mantenidas por debajo del punto de ebullición para mantener la continuidad eléctrica. El efecto global de la generación de calor es disminuir la caída de presión cerca del pozo mediante la reducción de la viscosidad del aceite y también la mejora de la movilidad del aceite.

El calentamiento de baja frecuencia provoca un aumento de temperatura más pequeño cerca de la zona de la cara del pozo que en el calentamiento a altas frecuencias. Esta condición impone una restricción en la respuesta de la producción que se puede obtener con el Calentamiento Eléctrico Resistivo (ERH en sus siglas en inglés).

Como se había mencionado anteriormente el calentamiento eléctrico en yacimientos con bajas frecuencias es denominado calentamiento Óhmico/Joule debido a que en este método la corriente eléctrica pasa a través de la formación y debido a la dispersión de energía, se produce calor que a su vez calienta el yacimiento. El agua intersticial es el elemento conductor que permite que la corriente a baja frecuencia penetre cierta profundidad dentro del yacimiento. Por medio de mecanismos de conducción iónica permite que la corriente se desplace a través del medio poroso. Este método puede ser empleado de forma adecuada en diferentes tipos de yacimientos que tienen diferentes profundidades, porosidades y permeabilidades, temperaturas, presiones y espesor, etc. (Oliveira et al. 2009)<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> MOHSIN REHMAN, Muhammad. "Conventional versus electrical enhanced oil recovery: a review". REVIEW PAPER - PRODUCTION ENGINEERING. 2012.

### **2.3.1 Ventajas y desventajas del calentamiento eléctrico resistivo frente otras técnicas de recuperación térmica**

Se puede observar que calentamiento eléctrico ofrece ventajas sobre otras técnicas de recuperación térmica bajo ciertas restricciones, sin embargo algunas condiciones pueden favorecer o restringir su aplicación como método de estimulación para zonas de aceite de alta viscosidad. A continuación se mostraran las ventajas y desventajas que se pueden presentar en la aplicación de un proceso de calentamiento eléctrico resistivo.

- **Ventajas de la aplicación de un proceso de Calentamiento Eléctrico Resistivo**<sup>18 19</sup>
  - La potencia que es transmitida al sistema es disipada en su gran mayoría dentro de la formación de interés, mejorando la eficiencia del proceso de calentamiento.
  - No requiere de un fluido externo caliente de transporte a la zona de interés, eliminando de esta manera problemas operacionales por la baja inyectividad inicial de la zona y la generación, manejo y transporte de dichos fluidos.
  - No requiere quemar parte del aceite para lograr el calentamiento, como es el caso de la combustión in situ.

---

<sup>18</sup> SALAS, Alfredo. "ESTUDIO EXPERIMENTAL DE RECUPERACIÓN MEJORADA POR EFECTO JOULE EN UN YACIMIENTO FRACTURADO". Tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de México. México DF, 2012.

<sup>19</sup> Akshay Sahni and Mridul Kumar "ELECTROMAGNETIC HEATING METHODS FOR HEAVY OIL RESERVOIRS". Chevron Petroleum Technology Company. SPE 62550. California, 2000.

- Las pérdidas de calor hacia las formaciones adyacentes en zonas de poco espesor son relativamente bajas.
- No necesita un pozo adicional para inyectar fluidos o diferir producción para inyectarlos, la producción de fluidos del yacimiento se realiza de manera simultánea con el proceso de suministro de energía eléctrica.
- La transmisión de energía se realiza directamente en la zona de interés.
- No requiere de grandes instalaciones, ni grandes espacios. Hay disponibilidad de corriente eléctrica a frecuencias de 60 Hz, y equipos tales como transformadores y medidores que trabajan a dicha frecuencia.
- Puede utilizarse como método de precalentamiento para procesos de inyección de vapor.
- La presencia de heterogeneidades de la formación no producen un efecto considerable en el proceso de calentamiento.
- **Desventajas de la aplicación de un proceso de Calentamiento Eléctrico Resistivo<sup>20 21</sup>**
  - Para la aplicación del método son requeridos pozos altamente costosos, debido a que la configuración del completamiento debe proporcionar un aislamiento térmico con el objetivo de garantizar la integridad de todo el equipo usado en el proceso de estimulación.

---

<sup>20</sup> SALAS, Alfredo. "ESTUDIO EXPERIMENTAL DE RECUPERACIÓN MEJORADA POR EFECTO JOULE EN UN YACIMIENTO FRACTURADO". Tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de México. México DF, 2012.

<sup>21</sup> Akshay Sahni and Mridul Kumar "ELECTROMAGNETIC HEATING METHODS FOR HEAVY OIL RESERVOIRS". Chevron Petroleum Technology Company. SPE 62550. California, 2000.

- Se requiere una saturación de agua mínima, si el contenido de agua se reduce no habría continuidad eléctrica. Puesto que el agua proporciona el camino de conducción iónica. Por tanto la temperatura del proceso no debe ser superior a la temperatura de ebullición del agua intersticial a condiciones de presión de yacimiento.
- Solo el agua que se encuentre intercomunicada intervendrá en el proceso de transmisión de la corriente eléctrica a través de la zona de interés.
- La transmisión de calor a través del yacimiento no se presenta de manera uniforme, debido a que la geometría del flujo de corriente producida por el electrodo genera que se presenten zonas de alta densidad de corriente, lo que produce que en estas zonas sea mayor la tasa de calentamiento. Esto ocasiona una posible disminución en la eficiencia del proceso, ya que en estas zonas de alta densidad de corriente se pueden alcanzar temperaturas por encima de la temperatura de ebullición del agua provocando el rompimiento del circuito eléctrico al evaporarse dicha agua.

## **2.4 CONDUCCIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA A TRAVÉS DEL MEDIO POROSO**

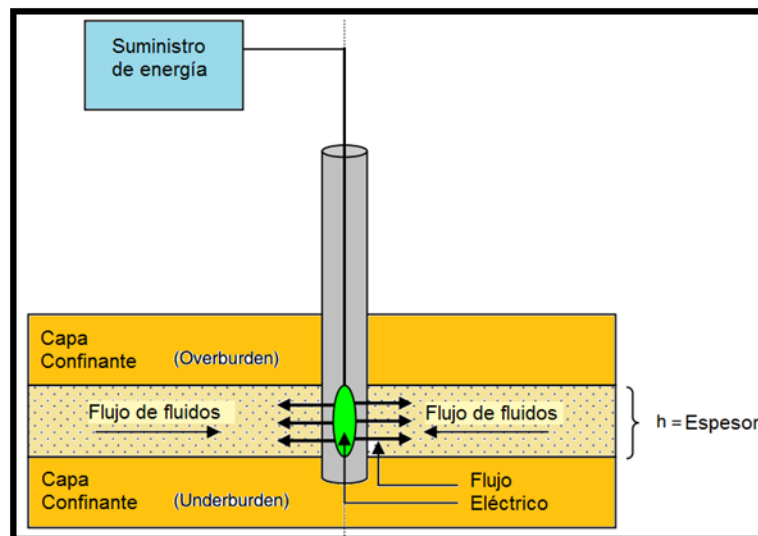
El uso del calentamiento eléctrico resistivo tiene importantes aplicaciones potenciales para el recobro de aceites pesados. El calentamiento de los fluidos de la formación y medios porosos pueden conducir a la mejora de la movilidad de la fase oleica, con relación a las fases acuosa y de gas, mediante la reducción de su viscosidad en varios ordenes de magnitud con un posterior aumento en la producción.

La energía electromagnética calienta desde dentro y de forma instantánea; por tanto, este método es relativamente independiente de la conductividad térmica del

aceite en la arena y de la heterogeneidad del yacimiento. Este método puede ser especialmente beneficioso donde los métodos convencionales no pueden ser usados debido a su profundidad, discontinuidad de la formación, no hay agua disponible para generar vapor, o pérdidas excesivas de calor, como se había mencionado con anterioridad<sup>22</sup>.

Este proceso no requiere transportar fluido caliente, lo que evita las complicaciones asociadas a la generación y transporte de un fluido caliente, y permite que sea aplicado en pozos con baja inyectividad. No requiere la eliminación de aguas residuales, y el equipo eléctrico no ocupa demasiado espacio. Además, un solo pozo puede ser utilizado para introducir energía a la formación a través de una fuente de alimentación, así como para recuperar los fluidos producidos. Como se observa en la **Figura 4**.

**Figura 4. Suministro de energía a la formación a través de una fuente de alimentación.**



**FUENTE:** CARRIZALES, Marlin. *Recovery of Stranded Heavy Oil by Electromagnetic Heating. Tesis. Faculty of the Graduate School of The University of Texas, 2010.*

<sup>22</sup> CARRIZALES, Marlin. *Recovery of Stranded Heavy Oil by Electromagnetic Heating. Tesis. Faculty of the Graduate School of The University of Texas, 2010.*

- **Agua intersticial:** Se comporta como un elemento conductor de la corriente eléctrica debido a la presencia de sales disueltas en su interior. Al ser sometida a una diferencia de potencial eléctrico alguna zona del yacimiento se crea un campo eléctrico y con éste una corriente eléctrica. Cuando se aplica una diferencia de potencial entre dos puntos, las sales disueltas en el agua intersticial se disocian en una serie de iones, los cuales debido al efecto del campo eléctrico que ha sido generado inician un movimiento representado por un flujo de cargas positivas y negativas a través del agua, lo cual físicamente es conocido como corriente eléctrica<sup>23</sup>. Cada uno de los iones en movimiento son capaces de transportar una carga eléctrica específica, de esta manera a medida que el agua del yacimiento tenga una mayor concentración de sales, mayor será el número de iones en solución y existirá una mayor capacidad para transportar la corriente eléctrica a través del medio poroso. Con base en lo anterior, entre mayor sea la concentración de sales en el agua intersticial menor será la resistividad de está y consecuentemente se reducirá la resistividad de la roca.

Además de ser una función de la concentración de las sales, la resistividad del agua intersticial presenta una serie de cambios con la temperatura, las cuales están asociadas con la viscosidad del fluido. Los iones al fluir en el agua intersticial se ven restringidos por fuerzas de atracción que se forman debido a las fuerzas viscosas asociadas al fluido, las cuales se oponen al movimiento de los iones y por tanto al flujo de corriente.

- **Roca:** Una propiedad importante para la conducción de la corriente eléctrica a través del yacimiento es la porosidad, la cual se ve afectada por el grado de cementación de la roca, debido a que además de ser ocupado por fluidos el espacio poroso es ocupado por material cementante, lo que

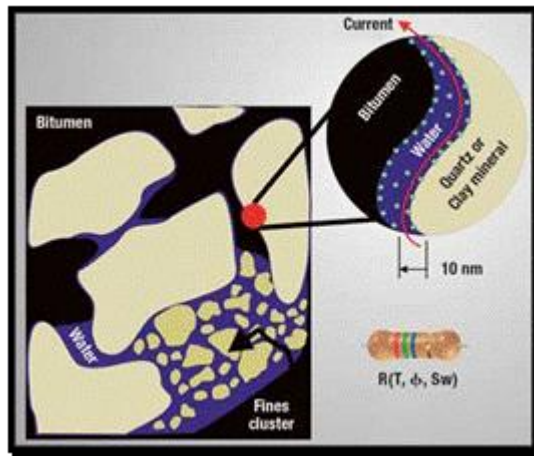
---

<sup>23</sup> McGEE, B. C. W. The Mechanisms of Electrical Heating for the Recovery of Bitumen from Oil Sand. University de Alberta. Petroleum Society of Canada, 2007.

conlleva a un aumento de la resistividad de la roca a medida que aumente este grado de cementación.

La corriente eléctrica requiere que sea conducida de manera efectiva a través del medio poroso, pero para esto no solo es necesario que exista un volumen de agua en éste, sino que también es necesario que dicha agua se encuentre interconectada de manera que exista un camino continuo de conducción, como se muestra en la **Figura 5**.

**Figura 5. Conducción de la corriente eléctrica a través del agua intersticial.**



- **FUENTE:** McGEE, Bruce C.W. *Electro-thermal pilot in the Athabasca oil Sands: Theory versus performance*. 2006.

Entonces, con base en lo anterior podría decirse que solo el agua que se encuentra interconectada de manera efectiva interviene en el proceso de conducción de la corriente eléctrica a través del medio poroso.

La matriz de la roca es considerada un material no conductor de la corriente eléctrica, en donde su estructura tiene gran influencia sobre la resistividad de la formación, la cual está determinada por un factor conocido como factor de resistividad de la formación, el cual se define como la función de la resistividad del

agua y de la resistividad de la roca saturada 100% con agua. Este factor se encuentra influenciado por factores tales como la salinidad del agua intersticial, porosidad de la roca, saturación de agua irreducible, cantidad, distribución y tipo de arcillas presentes en la roca, cantidad, distribución y tipo de minerales conductivos presentes en la roca.

Además de la porosidad y el grado de interconexión entre poros, existe una propiedad de las rocas que tiene gran influencia sobre la resistividad de ésta. La tortuosidad del medio es una propiedad que refleja la estructura del poro y que determina en cierta forma la longitud de la línea de flujo de la corriente. A medida que aumenta la tortuosidad del medio, la longitud del camino de flujo que debe recorrer la corriente para ir de un punto a otro del sistema es mayor, por tanto la resistividad de la roca también aumenta.

## **2.5 TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA EN CALOR<sup>24</sup>**

El análisis de calentamiento a baja frecuencia es descrito por las leyes de Kirchhoff y se usan distintos parámetros, tales como, voltaje, corriente, resistencia, capacitancia e inductancia.

El calentamiento eléctrico resistivo es el principal mecanismo cuando DC (corriente directa) o bajas frecuencias de poder eléctrico se utilizan (Wattenbarger and McDougal, 1988). Durante este método de calentamiento eléctrico resistivo una corriente eléctrica pasa a través de la formación y se calienta por efecto Joule (Oliveira et al. 2009). El calentamiento se presenta cuando la corriente eléctrica inducida para a través de un elemento resistivo en virtud de un gradiente de voltaje. El análisis del calentamiento en bajas frecuencias puede llevarse a cabo a

---

<sup>24</sup> CARRIZALES, Marlin. Recovery of Stranded Heavy Oil by Electromagnetic Heating. Tesis. Faculty of the Graduate School of The University of Texas, 2010.

través de un enfoque circuital basados en la aplicación de las leyes de Kirchhoff. Los parámetros usados son voltajes, corriente, resistencia, capacitancia e inductancia.

La ecuación de la corriente continua está dada por:

$$\nabla \left( \frac{1}{R} \nabla \Phi_e \right) = 0 \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde  $\Phi_e$  es el potencial en voltios

$R$  es la resistencia eléctrica en ohmios-metros.

Una vez el potencial es calculado, la rata de calentamiento volumétrico puede ser expresada como:

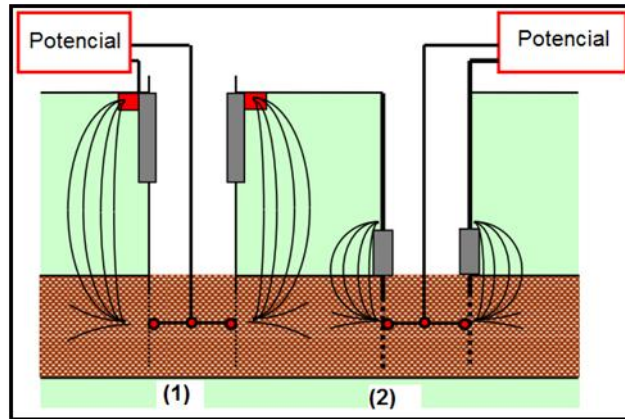
$$Q = R |\bar{J}|^2 \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde  $J$  corresponde a la densidad de frecuencia libre.

La **figura 6**, muestra dos esquemas típicos del calentamiento eléctrico resistivo. Una fuente de suministro externa genera una corriente de baja frecuencia que son transmitidos por cables a un dispositivo de presión conectado al casing de producción, mientras que el otro extremo está conectado a cualquiera de los siguientes dos formas:

- (1) Conectada a tierra
- (2) en algún nivel inferior, (Calarotti 2000).

**Figura 6. Esquemas típicos del calentamiento eléctrico resistivo.**



**FUENTE:** CARRIZALES, Marlin. *Recovery of Stranded Heavy Oil by Electromagnetic Heating. Tesis. Faculty of the Graduate School of The University of Texas, 2010.*

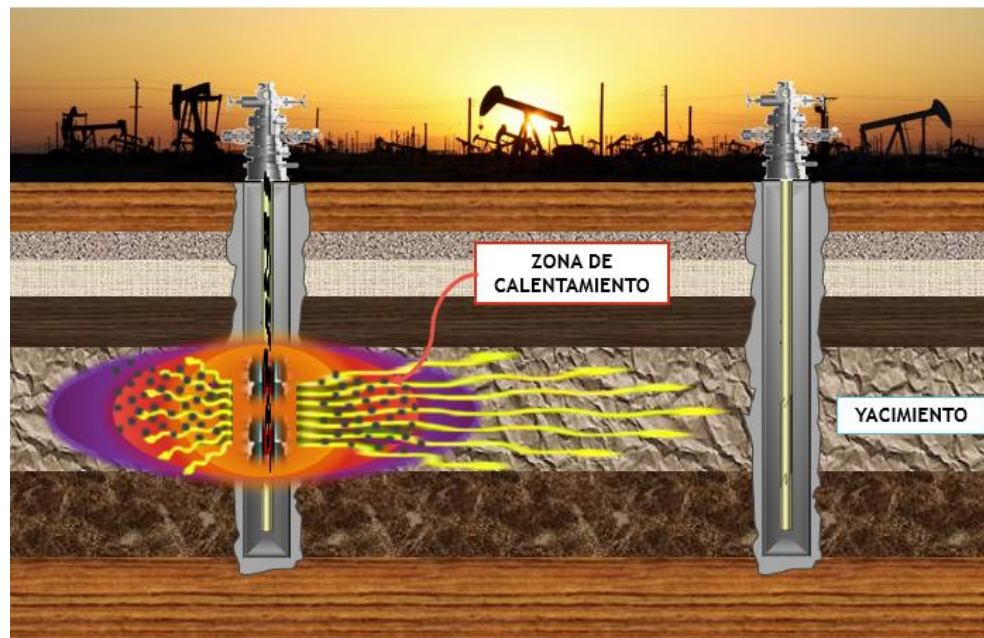
El calor dentro de la formación se genera debido a las pérdidas óhmicas, que significa que este método se basa en la presencia de humedad en el medio para establecer un camino conductor. El agua connata en un yacimiento homogéneo o la existencia de lutitas que contienen agua en un sistema heterogéneo proporcionará el camino conductor, por lo tanto, para mantener la conductividad eléctrica en la formación, al agua no se le debe permitir ebullición. (Wattenbarger y McDougal, 1988).

La cantidad de calor producida por el paso de la corriente eléctrica está dado a partir de la ley de Joule la cual establece que la cantidad de calor producido por el paso de una corriente eléctrica a través de un medio conductor es directamente proporcional a la resistencia del conductor, al cuadrado de la intensidad de la corriente eléctrica que lo atraviesa y al tiempo de aplicación de la corriente. Convencionalmente no se habla de la cantidad de calor generada por la corriente eléctrica sino que se habla de la razón a la cual la energía eléctrica es convertida en calor, la cual se conoce como potencia eléctrica.

### 2.5.1 Configuración de Calentamiento eléctrico resistivo

El calentamiento eléctrico resistivo u óhmico puede ocurrir cuando flujos de corriente alterna de baja frecuencia pasa a través del yacimiento, y la energía eléctrica es convertida en calor. Una de las más simples configuraciones se presenta cuando dos pozos de aceite vecinos pueden actuar como cátodo y ánodo. Una diferencia de potencial es aplicada a lo largo de los dos electrodos y una trayectoria eléctrica a través de la formación es prevista por el agua de formación. Sin embargo, es necesario tener en cuenta como parámetro fundamental del proceso de calentamiento eléctrico resistivo que la temperatura de la formación deben ser mantenidas por debajo del punto de ebullición de agua de formación a condiciones de presión de formación. La configuración descrita anteriormente es representada por la **figura 7**.

**Figura 7. Configuración de Calentamiento eléctrico resistivo**



FUENTE: Autores

## 2.6 PARAMETROS QUE AFECTAN EL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO<sup>25</sup>

Por medio de estudios fue posible determinar cuáles parámetros afectan el calentamiento eléctrico resistivo (ERH). Un modelo idealizado fue usado con las siguientes suposiciones: (1) la resistividad de *overburden* de la formación es igual a la resistividad de *underburden* con un valor de  $R_{ou}$ , (2) el radio del electrodo es igual al radio de la cara del pozo,  $r_w$ , y (3) el electrodo está centrado verticalmente dentro de la zona del yacimiento en el pozo.

Para este estudio se determinaron tres parámetros que afectan sobre el calentamiento resistivo. Los cuales son:

1. Espesor adimensional del yacimiento.
2. Longitud adimensional del electrodo.
3. Relación de resistividad de la formación.

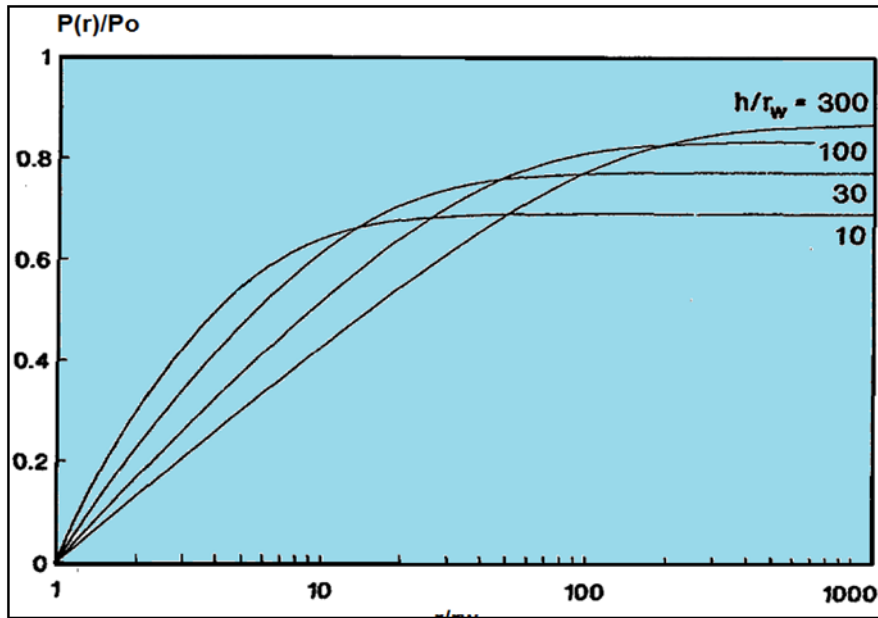
El espesor adimensional del yacimiento es definido como la relación,  $h/r_w$ . El efecto de este parámetro sobre el perfil del poder de disipación puede verse en la **Figura 8**.

Para grandes valores de este parámetro, más calentamiento se produce en la zona del yacimiento y el calor penetra mucho más en la formación. La penetración del calor dentro de la formación es importante debido a que el flujo de fluidos en la cara del pozo tiene un periodo de calentamiento más largo en el que experimenta un incremento en la temperatura.

---

<sup>25</sup> B.A.Baylor, J.B.Maggard, and R.A. Wattenbarg. Improved Calculation of Oil Production Response to Electrical Resistance Heating (ERH). SPE 20482. Texas, USA. 1990.

**Figura 8. Efecto del espesor adimensional del yacimiento ( $h/r_w$ ) sobre el perfil del poder de disipación.**

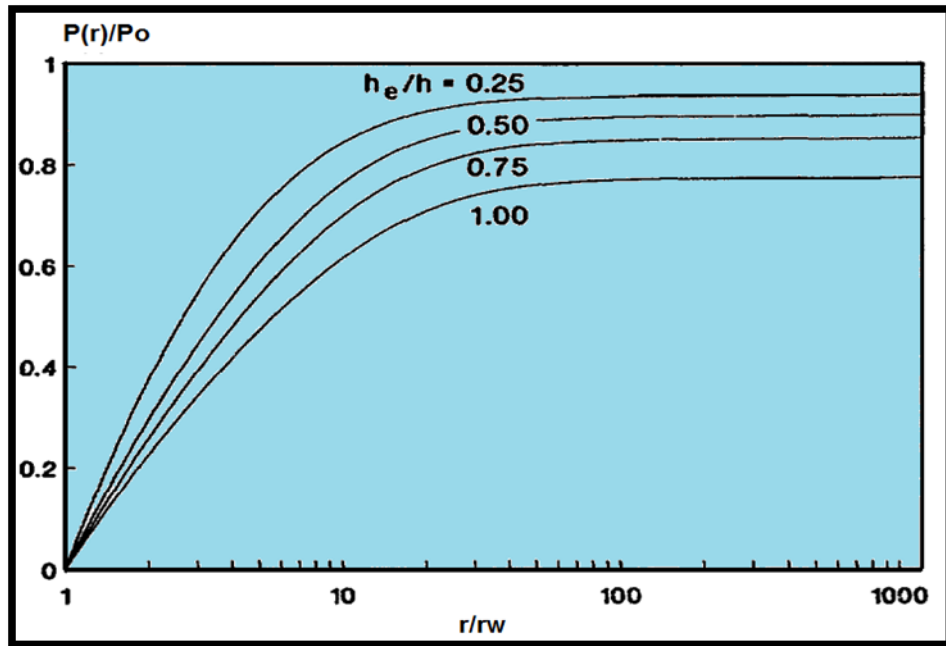


**FUENTE:** B.A.Baylor, J.B.Maggard, and R.A. Wattenbarg. *Improved Calculation of Oil Production Response to Electrical Resistance Heating (ERH)*. SPE 20482. Texas, USA. 1990. Modificada

La longitud adimensional del electrodo es la fracción del espesor del yacimiento que está en contacto con el electrodo verticalmente. Este parámetro se define como la relación,  $h_e/h$ . El efecto de la longitud adimensional del electrodo sobre el perfil del poder de disipación puede ser visto en la **Figura 9**.

Esta figura indica que para un electrodo más pequeño más del poder total es disipado en la zona del yacimiento. En el caso limite el electrodo se convertiría en una fuente puntual. Con un punto de origen de calor casi todo el poder sería disipado en la zona de yacimiento. Sin embargo, el calentamiento significativo solo se produciría en “el centro de la zona del yacimiento y esta calor solo podría penetrar una corta distancia en la formación.

**Figura 9.** Efecto de la longitud adimensional del electrodo ( $h_e/h$ ) sobre el perfil del poder de disipación.

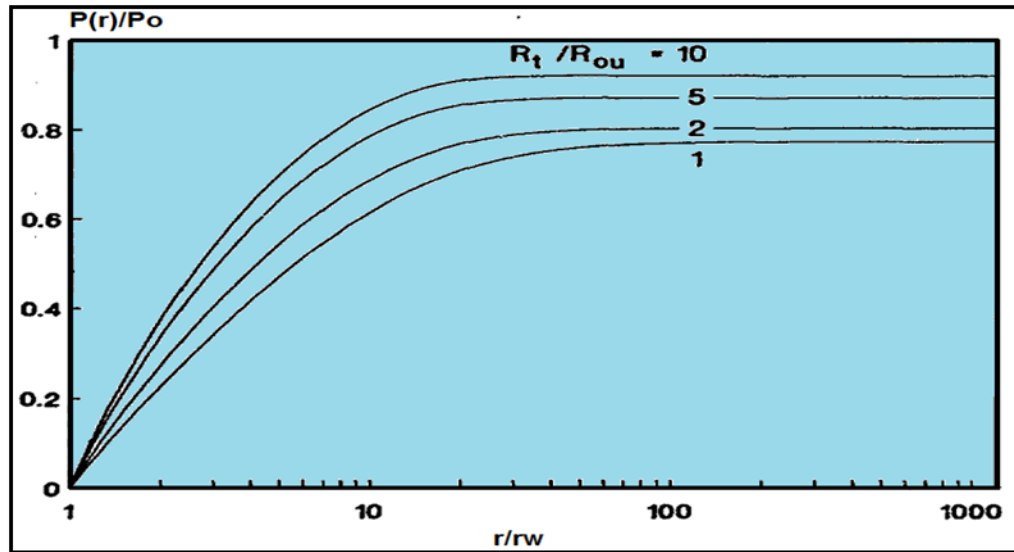


**FUENTE:** B.A.Baylor, J.B.Maggard, and R.A. Wattenbarg. *Improved Calculation of Oil Production Response to Electrical Resistance Heating (ERH)*. SPE 20482. Texas, USA. 1990. Modificada

La relación de resistividad de la formación describe las propiedades eléctricas relativas de la zona del yacimiento, overburden y underburden. La resistividad overburden y underburden es asumida a ser el valor de  $R_{ou}$ . La relación  $R_f/R_{ou}$  es la definición de la relación de resistividad de la formación.

**La figura 10**, muestra el efecto de este parámetro sobre el perfil del poder de disipación. La figura indica que para una relación de resistividad de la formación mayor causa que una mayor fracción del poder total será disipada en la zona del yacimiento. Para un poder o potencial total especificado estos tres parámetros dan una descripción casi completa del calentamiento de la formación por medio del calentamiento eléctrico resistivo. Un parámetro adicional que tiene un efecto es el perfil de temperatura de la formación. A medida que aumenta la temperatura cerca de la cara del pozo la energía es disipada más lejos en la formación.

**Figura 10. Efecto de la relación de resistividad de la formación sobre el perfil del poder de disipación.**



**FUENTE:** B.A.Baylor, J.B.Maggard, and R.A. Wattenbarg. *Improved Calculation of Oil Production Response to Electrical Resistance Heating (ERH)*. SPE 20482. Texas, USA. 1990. Modificada

**Otros de los principales parámetros tanto de la roca como de los fluidos que influyen durante un proceso de calentamiento electro magnético por efecto Joule son:**

- Viscosidad del aceite
- Viscosidad del gas
- Permeabilidad relativa  $K_r$
- Expansión térmica
- Conductividad térmica
- Frecuencia eléctrica
- Salinidad del agua de formación

### 2.6.1 Ley de Archie

El yacimiento por contener aceite, tendrá un comportamiento similar a un capacitor, el cual será capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico. El aceite actuará como un material dieléctrico permitiendo este comportamiento. El simulador STARS de CMG trabaja el yacimiento como si este fuera un resistor, por ende, este se basa en la Ley de Archie y sus respectivos coeficientes para la simulación y modelamiento del proceso de transferencia de energía eléctrica.

Una relación llamada la ley de Archie describe como la resistividad eléctrica de la roca, la porosidad y la resistividad del fluido dependen entre sí. En el cálculo de la resistividad de la roca porosa saturada se utiliza la ley de Archie, donde se expresa la resistividad como una función de la saturación de agua  $S_w$  y la porosidad de la roca  $\phi$ , la resistividad del agua  $P_w$  y los coeficientes experimentales  $a$ ,  $m$  y  $n$  que son característicos de cada yacimiento.

$$\rho_{dc} = \left( \frac{a \cdot \rho_w}{\phi^m \cdot S_w^n} \right) \quad \text{Ecuación 29}$$

$S_w$  = porción de los espacios porosos llenados con agua u otro tipo de fluido  
 $n \approx 2$

$a$ : constante con  $0,6 < a < 2,5$

$m$ : constante con  $1,3 < m < 2,5$ .

La ley de Archie establece las siguientes proporcionalidades:

- La resistividad de la roca es inversamente proporcional a la porosidad de la misma.
- La resistividad de la roca es inversamente proporcional a la saturación de agua de la misma

Todos los métodos eléctricos sensibles para la resistividad y empleados en la superficie detectan la resistividad eléctrica total de un volumen de roca situada en cierta profundidad (in situ).

Los valores de resistividad eléctrica obtenidos de esta manera reflejan la combinación de los efectos de todos los mecanismos conductivos. El rango de resistividad eléctrica de las rocas es amplio y se extiende desde  $10^{-2}$  hasta  $10^8 \Omega m$  y mayor. Para las rocas y minerales son:

- Conductores buenos con  $r < 1,0 \Omega m$
- Conductores intermedios con  $r = 1 - 100 \Omega m$
- Conductores pobres con  $r > 100 \Omega m$ .

### **3. MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO**

Para la generación de un modelo de simulación numérica del calentamiento eléctrico resistivo en un campo maduro es importante diseñar un plan de ejecución que tenga en cuenta todas las consideraciones y aspectos propios del proceso. Durante este capítulo se presentará la metodología con la que se trabajó para la elaboración del modelo de calentamiento, el cual comprende un reconocimiento y ubicación del campo Colorado, criterios de selección de pozos candidatos al proceso de calentamiento, recopilación de información de las características pertenecientes al campo, propiedades de las rocas y fluidos, los cuales son de gran relevancia a la hora de que el simulador reproduzca el comportamiento real del campo.

#### **3.1 GENERALIDADES CAMPO ESCUELA COLORADO**

Campo Escuela Colorado es un campo maduro que durante más de 50 años ha producido hidrocarburos. Actualmente el crudo producido tiene una gravedad API de alrededor de 39 grados y esta característica ha presentado un crecimiento a partir del año 2006.

Campo Colorado tiene actualmente 26 pozos activos, 18 pozos abandonados y 31 pozos inactivos, para un total de 75 pozos. Durante toda su historia de producción el campo ha presentado problemas de precipitación de parafinas y ha venido depletando su producción considerablemente<sup>26</sup>

---

<sup>26</sup> VILLAREAL, Erika; MOYA, Helda. "ANÁLISIS DE FLUIDOS APLICADO A LOS HIDROCARBUROS EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2012.

### 3.1.1 UBICACIÓN

El Campo escuela Colorado se encuentra ubicado en la cuenca del Valle Medio del Magdalena en la Provincia Estructural del Piedemonte Occidental de la Cordillera Oriental en el Departamento de Santander en la Vereda Los Colorados en jurisdicción del municipio de San Vicente de Chucuri. Situado al sudeste de la ciudad de Barrancabermeja y el sur del Campo La Cira-Infantas y más exactamente entre los campos Aguas Blancas y San Luis. Entre las coordenadas<sup>27</sup>:

X= 1'036.000 – 1'040.500 Este

Y= 1'238.000 – 1'247.500 Norte con origen en Bogotá

En la **figura 11**, se muestra la ubicación geográfica del Campo Colorado en un mapa del departamento de Santander.

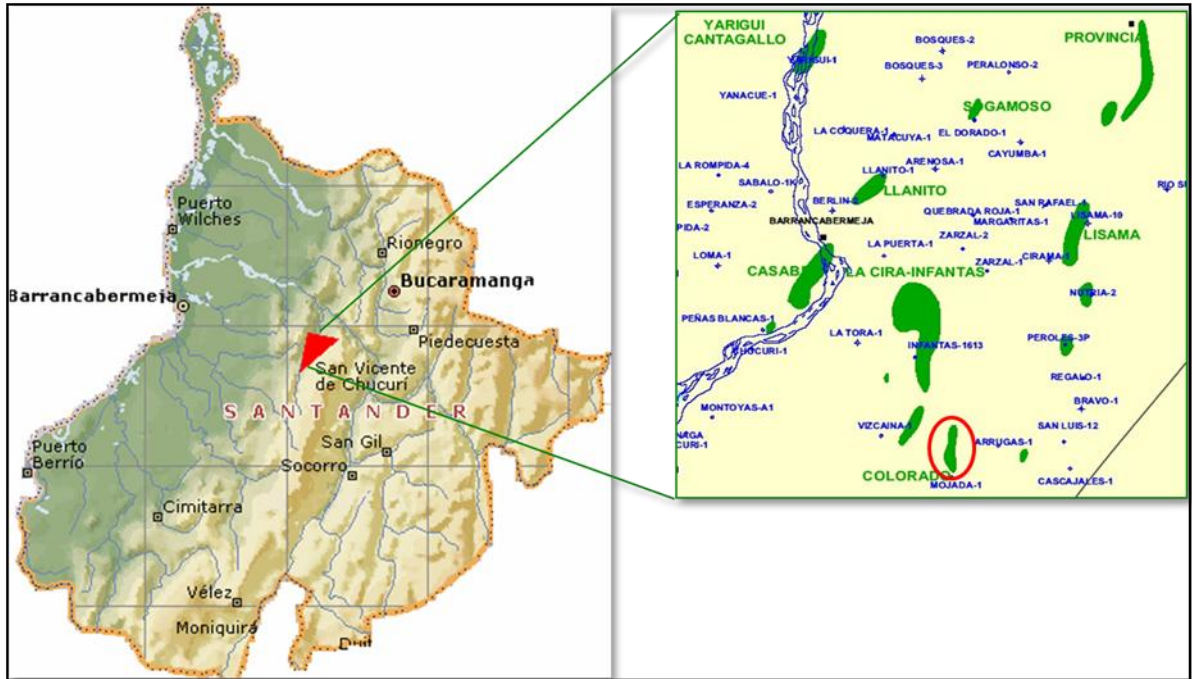
### 3.1.2 ANTECEDENTES HISTORICOS

La exploración del Campo Colorado se realizó entre los años de 1923 a 1932 en donde la Compañía Tropical Oil Company perforó inicialmente 7 pozos, la mayoría presentando problemas mecánicos, posteriormente en 1945 se perforaron 8 pozos con los cuales se realizaron pruebas obteniendo resultados alentadores. Entre los años 1953 a 1964 Ecopetrol desarrolló completamente el campo, mediante la perforación de 60 pozos para un total de 75.

---

<sup>27</sup> GARCÍA, Jerson; FONSECA, Crespín. "MODELO SEDIMENTOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO DE LA FORMACIÓN MUGROSA EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO". Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga, 2009.

**Figura 11. Ubicación geográfica del Campo Colorado en un mapa del departamento de Santander**



**FUENTE:** Modificada. Tesis: Modelo sedimentológico y estratigráfico del Campo Escuela Colorado. Andrés Mantilla y Crispin Fonseca

Campo Colorado, alcanzó su máximo de producción en Noviembre de 1961 con 1765 BOPD<sup>28</sup>, sin embargo esta producción declinó rápidamente hasta llegar a un valor de 467 BOPD en 1966. Durante este periodo se presentaron perdidas de pozos productores debido a diferentes problemas mecánicos y el taponamiento de tuberías de producción con parafinas.

Desde el año 1966 hasta el año 1976 la producción se mantuvo en un promedio de 670 BOPD. A partir de 1976 se presentó un notorio descenso en la producción,

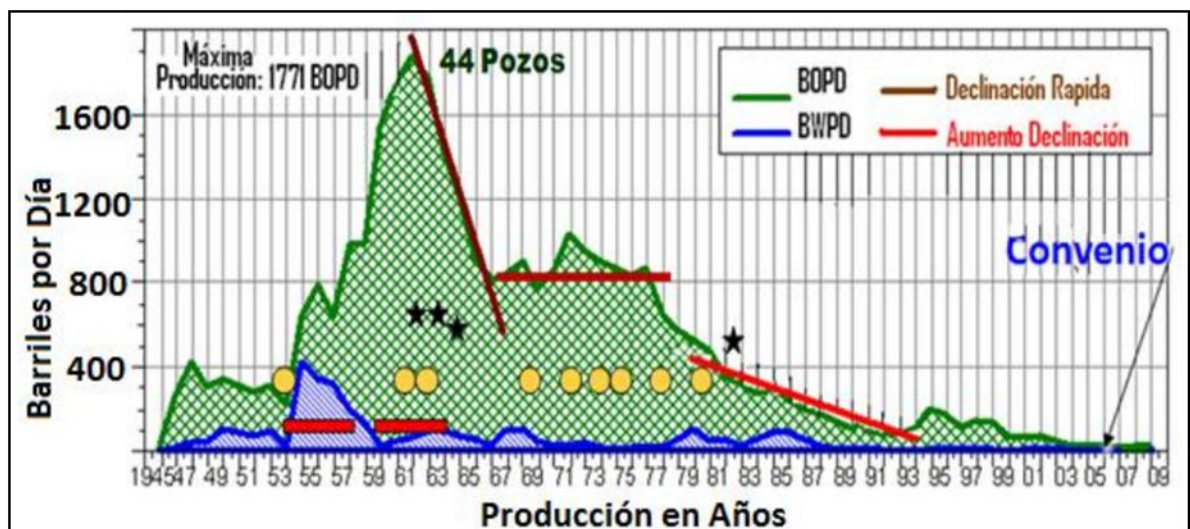
<sup>28</sup> RAMIREZ, Wilman. "CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y MINERALÓGICA PRELIMINAR DE FACIES ARENOSAS Y LODOSAS DE LA FORMACIÓN MUGROSA EN EL SECTOR DEL CAMPO ESCUELA COLORADO, CUENCA DEL VALE MEDIO DEL MAGDALENA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga, 2009.

pasando de producir 692 BOPD en 1976 a 47 BOPD en 1989, catalogándose a partir de ese momento como un campo poco productor<sup>29</sup>.

La complicada continuidad lateral del yacimiento y el poco espesor de las areniscas de la Formación Mugrosa han ocasionado que la producción estimada de cada uno de los pozos sea reducida (por debajo de los 300.000 bls). También han jugado un papel importante en la historia de producción el estado operacional de los pozos, cuyas fallas más frecuentes se deben a fallas mecánicas y/o la acumulación de parafinas en la tubería (Parra et al, 2003).

La **figura 12**, ilustra el comportamiento histórico de producción promedio por día del Campo Colorado, desde los inicios de producción en 1945 hasta finales del 2009.

**Figura 12. Comportamiento histórico de producción promedio por día del Campo Colorado.**



**FUENTE:** Producción histórica campo Colorado. INSPECCIÓN VISUAL A LAS INSTALACIONES DEL CAMPO ESCUELA COLORADO. DELGADO, Ronald; RODRIGUEZ, Carlos. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica, 2012

<sup>29</sup> GARCÍA, Jerson; FONSECA, Crespín. "MODELO SEDIMENTOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO DE LA FORMACIÓN MUGROSA EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO". Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga, 2009.

En su comportamiento histórico el Campo Colorado tiene una muy baja producción de agua, debido a que el campo posee una influencia mínima o nula de algún tipo de acuífero. La producción de gas estuvo casi siempre constante desde 1989 hasta 2005 con un valor promedio de 225 MSCF/día<sup>30</sup>. (Datos del Informe preliminar de Ecopetrol en marzo de 2005).

Desde Junio de 2006 el Campo Colorado fue entregado por Ecopetrol a la Universidad Industrial de Santander, con el objetivo de proporcionar una oportunidad para la innovación, la investigación y el desarrollo desde la academia. Convirtiéndose Campo Colorado en un espacio para la investigación de Campos maduros en la Universidad Industrial de Santander.

En la actualidad el Campo Colorado cuenta con la participación de un socio tecnológico, junto con el cual se ha logrado la reactivación de este campo y al fortalecimiento de su estructura operacional.

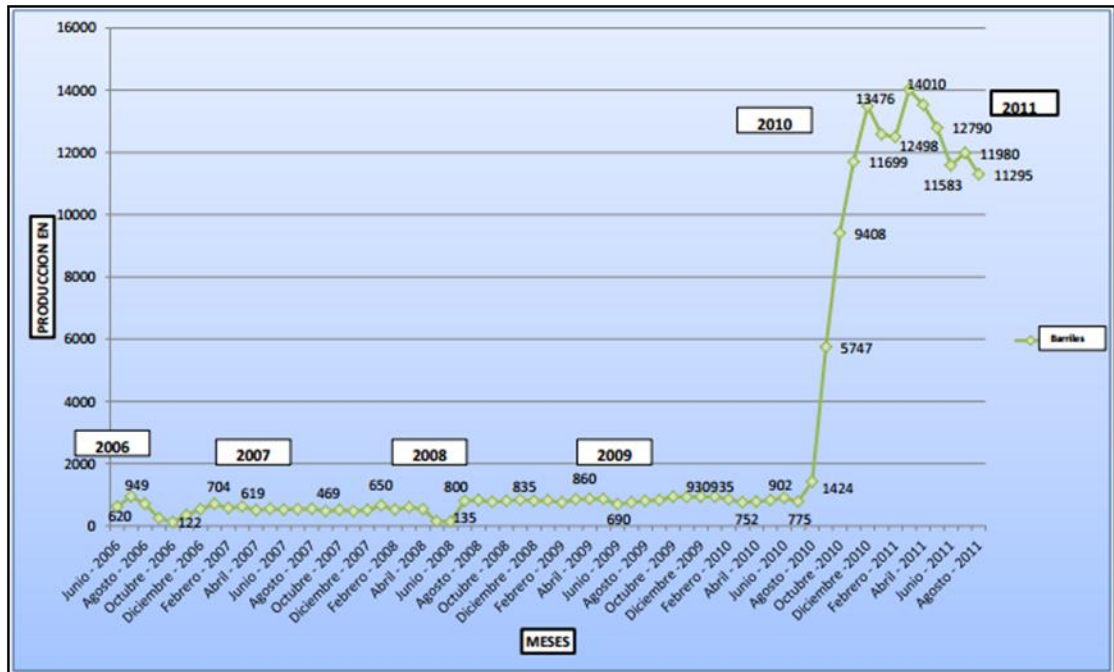
El Campo Escuela Colorado ha mejorado su producción desde agosto del 2010 incrementándola de forma importante, debido a la reactivación de varios pozos. La producción promedia durante el mes de agosto es de 408 a 466 BOPD. La **figura 13**, muestra que desde junio del 2006 hasta julio del 2010 se mantiene una producción constante. Solo hasta agosto del 2010 comienza a aumentar la producción debido a la reactivación de varios pozos llegando en febrero del 2011 hasta una producción de 14000 barriles mes (466 barriles por día)<sup>31</sup>.

---

<sup>30</sup> VILLAREAL, Erika; MOYA, Helda. "ANÁLISIS DE FLUIDOS APLICADO A LOS HIDROCARBUROS EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2012.

<sup>31</sup> DELGADO, Ronald; RODRIGUEZ, Carlos. "INSPECCIÓN VISUAL A LAS INSTALACIONES DEL CAMPO ESCUELA COLORADO". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Bucaramanga, 2012.

**Figura 13. Producción mensual de crudo Campo Colorado.**



**FUENTE:** Producción de Crudo (Bls/mes). INSPECCIÓN VISUAL A LAS INSTALACIONES DEL CAMPO ESCUELA COLORADO. DELGADO, Ronald; RODRIGUEZ, Carlos. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica, 2012

## 3.2 SELECCIÓN DEL POZO CANDIDATO PARA EL PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

### 3.2.1 Consideraciones de diseño de pozos que serán estimulados con Calentamiento Eléctrico

En el momento del diseño de facilidades para el proceso de calentamiento se deben tener en cuenta los requerimientos de las operaciones básicas de completamiento, además de otras consideraciones importantes concernientes con la operación específica del método de calentamiento electromagnético:

- I. Efectos de la frecuencia
- II. Pérdidas de energía
- III. Aislamiento del equipo mediante varios mecanismos

Para el diseño del completamiento se deben analizar cuatro áreas, las cuales son consideraciones relacionadas con los factores implícitos en una operación básica de completamiento, las cuales son descritas a continuación:

- 1) Los parámetros del pozo y sus efectos en el completamiento
  - 2) Los métodos del completamiento y el equipo disponible
  - 3) Costos y desempeño
  - 4) La factibilidad económica
- **Parámetros del pozo:** el factor primario que se debe tener en cuenta en el diseño del completamiento es el yacimiento. Se debe analizar características importantes del yacimiento tales como: la profundidad, la presión de fondo, la temperatura y la permeabilidad, las cuales determinarán factores de inyectividad, características de flujo y técnicas de estimulación.

Además considerando de igual forma los lineamientos legales y de seguridad<sup>32</sup>. En la siguiente tabla se especificarán cuáles son los efectos en el diseño del completamiento correspondiente a cada parámetro del pozo:

---

<sup>32</sup> MONROY, Manuel; FIGUEROA, Diego. "DISEÑO DEL COMPLETAMIENTO DE UN POZO QUE SE SOMETERA A ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMÁGNÉTICO". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2005.

**Tabla N°1.** Parámetros del Pozo y sus efectos.

- Selección del proceso de recobro
  - Requerimientos de presión y temperatura para elementos tubulares, equipos de subsuelo y accesorios
- Número de intervalos perforados
- Requerimientos para levantamiento artificial
- Requerimientos de control de flujo
  - Requerimientos de mantenimiento
  - Requerimientos de “liner”
  - Disponibilidad de equipos de subsuelo
  - Flexibilidad del diseño del completamiento
  - Restricciones adicionales de completamiento
- Severidad de los problemas de corrosión

**FUENTE:** MONROY, Manuel; FIGUEROA, Diego. “DISEÑO DEL COMPLETAMIENTO DE UN POZO QUE SE SOMETERA A ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMÁGNÉTICO”. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2005.

- **Métodos del completamiento y el equipo disponible:** es necesario seleccionar un mecanismo que permita controlar la corrosión con el fin de extender la vida útil de los equipos de subsuelo. Debido a que es

fundamental que las áreas en contacto con humedad cuenten con algún tipo de protección o materiales con una aleación resistente a la corrosión<sup>33</sup>.

- **Costos y desempeño:** Para determinar el diseño final de un completamiento se deberá tener en cuenta el punto de vista económico. Un diseño de completamiento podría no ajustarse efectivamente a todos los operados y yacimientos; por esto, las decisiones de diseño se deberán tomar con base a prácticas de ingeniería y planeamiento adecuado<sup>34</sup>.
- **Factibilidad económica:** Por medio de un análisis cuidadoso de la estimación de costos exactos y la planeación general del proyecto se pueden determinar los mejores diseños para el proceso de calentamiento. Estos análisis deben ser detallados con el fin de que a través de ellos se pueda llegar a estimar si el proyecto tiene una factibilidad económica. Un factor importante, pero el cual es difícil asignarle un valor costo/beneficio es la habilidad del equipo técnico de soporte para proveer el servicio necesario a los equipos.

### **3.2.1.1 EFECTOS DE LA FRECUENCIA**

El Calentamiento Eléctrico Resistivo trabaja a frecuencias menores de 300 KHz, en donde la formación actúa como elemento calentado. Las bajas frecuencias resultan en bajas intensidades y una mayor profundidad de penetración. Si se considera trabajar con frecuencias bajas, por debajo de los 60 Hz, se puede esperar que las pérdidas de calor disminuyan y la profundidad de penetración se incremente, sin embargo esto provocaría un aumento en la tasa de corrosión<sup>35</sup>.

---

<sup>33</sup> (6) CASTELLANOS, Henry; GRAJALES, Fernando. "MODELO ANALÍTICO DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO APLICADO A LA FORMACIÓN EN YACIMIENTOS DE ACEITE PESADO". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2004.

<sup>34</sup> (5) MONROY, Manuel; FIGUEROA, Diego. "DISEÑO DEL COMPLETAMIENTO DE UN POZO QUE SE SOMETERÁ A ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2005.

<sup>35</sup> Bruce C. W. McGee and Fred E. Vermeulen. "POWER LOSSES IN STEEL PIPE DELIVERING VERY LARGE CURRENTS". IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. XX, NO. Y, MMM YYYY.

### **3.2.1.2 PÉRDIDAS DE ENERGÍA**

Se pueden presentar pérdidas de calor en la formación principalmente en las formaciones adyacentes a la zona productora debido a un aumento de la temperatura en esta zona ocasionando un gradiente de temperatura en el contacto entre la zona productora y las formaciones adyacentes a la misma, generando una transferencia de calor por conducción.

De igual forma se pueden presentar pérdidas de calor hacia el pozo productor generadas por la producción de fluidos calientes del yacimiento. Cuando se inicia la producción de fluidos este trae consigo el calor producido en la formación hacia el pozo productor por medio del mecanismo de transferencia de calor conocido como convección. En la **figura 14**, se puede observar cómo se producen estas pérdidas en el calentamiento eléctrico resistivo<sup>36</sup>.

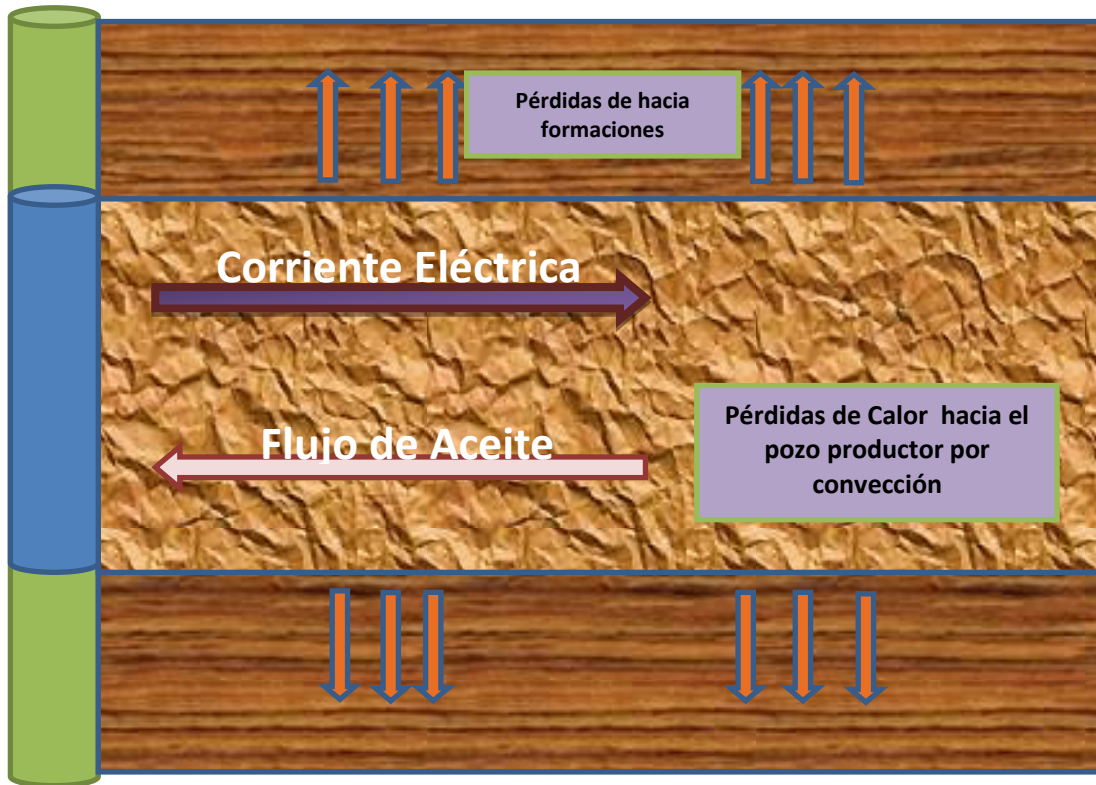
Las pérdidas de calor también se pueden generar en el sistema de transmisión de potencia, debido a que este sistema se encuentra conformado fundamentalmente por materiales conductores que por su composición metálica tienden a disipar parte de la potencia suministrada a través de ellos, de forma que no toda la potencia suministrada es conducida a la formación productora. Este tipo de pérdidas se producen principalmente por el fenómeno de histéresis en los metales, son bastante significativas y limitan la magnitud de corriente que se puede usar en el calentamiento eléctrico<sup>37</sup>.

---

<sup>36</sup> MERCADO, Diana; RICARDO, Jesus. "ESTUDIO DE SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEM ROCA-FLUIDO DE UN YACIMIENTO DE CRUDO PESADO AL SER SOMETIDO A CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2005.

<sup>37</sup> MONROY, Manuel; FIGUEROA, Diego. "DISEÑO DEL COMPLETAMIENTO DE UN POZO QUE SE SOMETERA A ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMÁGNÉTICO". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2005.

**Figura 14. Pérdidas de Calor en la formación durante el proceso de calentamiento eléctrico resistivo.**



**FUENTE:** Modificado. MERCADO, Diana; RICARDO, Jesus. "ESTUDIO DE SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEM ROCA-FLUIDO DE UN YACIMIENTO DE CRUDO PESADO AL SER SOMETIDO A CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO". 2005

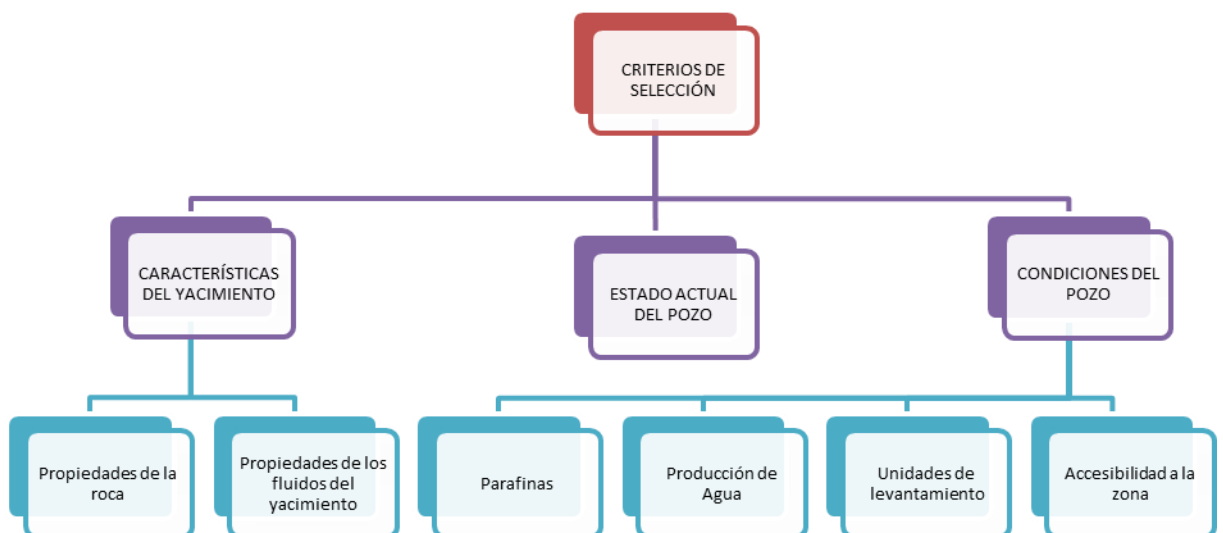
### **3.2.1.3 AISLAMIENTO DEL EQUIPO MEDIANTE VARIOS MECANISMOS**

Cuando un pozo ya existente es tomado como parte del sistema del calentamiento eléctrico resistivo, este debe ser acondicionado para soportar estas condiciones por medio de la creación de secciones de aislamiento ubicadas por encima de la zona productora. Estas secciones son construidas disgregando parte del revestimiento en la parte superior de la zona productora y recubriéndolo con un liner no conductor. También se hace necesario que la tubería de producción se aisle del revestimiento por medio de centralizadores no conductivos.

### 3.2.2 Aplicación de criterios para la selección del pozo candidato a Calentamiento Eléctrico Resistivo

Se deben establecer criterios para la selección de pozos candidatos a un proceso de calentamiento eléctrico resistivo aplicables a campos maduros, en donde es preciso tener en cuenta aspectos fundamentales como las propiedades de la roca y los fluidos del yacimiento, condiciones y estado actual de los pozos. La **figura 15**, muestra los principales criterios considerados para la selección del pozo candidato a un calentamiento en un campo maduro.

**Figura 15. Criterios de selección del pozo candidato.**



**FUENTE:** Modificado de “CONSIDERACIONES Y PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS PVT DEL CRUDO CAMPOS MADUROS. APLICACIÓN CAMPO COLORADO. Aramendiz Jose y Velasquez Miguel, 2008.

Los criterios de selección tenidos en cuenta para la selección del pozo fueron<sup>38</sup>:

- 1) El pozo presenta una producción sin intermitencia, se requiere que el pozo produzca contantemente.
- 2) No tiene problemas de arenamiento u otros problemas operacionales.
- 3) Se cuente con información petrofísica del yacimiento en el pozo a seleccionar.
- 4) No tenga una producción en exceso de agua.
- 5) Facilidades de superficie, es decir que cuente con las condiciones para ser adaptado a un proceso de calentamiento.

Se analizaran cada uno de los pozos que se encuentran activos aplicando los criterios de selección. A agosto de 2012 el campo Colorado cuenta con 28 pozos activos los cuales son mostrados en la tabla 1 junto con una descripción de las condiciones actuales de cada pozo.

**Tabla 1. Pozos candidatos a seleccionar.**

		TOPE	BASE		BOPD	BWPD	SCFD	
<b>COL 25</b>	B1	1988	2004	Produciendo	4,58	0	-	Buen candidato
	B2	2129	2132					
<b>COL 27</b>	C1	3500	3660	Produciendo	7,2	0,09	-	Buen candidato
	C2	3920	4106					
<b>COL 38</b>	B2	1829	2110	Produciendo	10,4	8,9	-	Alto corte agua
	C1	3396	3488					
	C2	3723	4006					
<b>COL 24</b>	B1	1869	2070	Produciendo	9,27	0,71	-	Buen candidato
	B2	2083	2228					
	C2	3623	4070					
	ZNA	4125	4128					

<sup>38</sup> VILLAREAL, Erika; MOYA, Helda. "ANÁLISIS DE FLUIDOS APLICADO A LOS HIDROCARBUROS EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2012.

		TOPE	BASE		BOPD	BWPD	SCFD	
<b>COL 23</b>	B1	1944	1952	Produciendo	23,36	2,16	-	Buen candidato
	B2	2140	2146					
	C1	3357	3476					
	C2	3604	3634					
<b>COL 44</b>	C1	3896	4035	Produciendo	39,93	4,09	-	Buen candidato
	C2	3604	3634					
	C3	4564	4616					
	ZNA	5331	5570					
<b>COL 31</b>	B1	1993	2158	Produciendo	9,13	0	-	Pozo intermient
	B2	2418	2642					
	C1	3816	4022					
	C2	4115	4174					
	C3	4487	4536					
<b>COL 35</b>	C2	3828	4088	Produciendo	2,33	0	-	Buen candidato
	C3	4257	4344					
	ZNA	5233	5627					
<b>COL 52</b>	C1	4005	4152	Produciendo	5,4	13,91	-	Alto corte Agua
	C2	4329	4556					
	C3	4656	4703					
	ZNA	4998	5854					
<b>COL12</b>	C2	4754	4770	Arenado	-	-	-	Arenado
	C3	4830	4893					
	D	5262	5525					
<b>CO 70</b>	C1	2964	2976	Produciendo	1,84	0	-	Buen candidato
	C2	3024	3156					
<b>COL 76</b>	C1	4220	4332	Produciendo	2,276	0,05	-	Pozo intermitent
	C2	4895	4910					
	C3	5155	5163					
	D	5262	5544					
<b>COL 33</b>	C1	3704	3892	Produciendo	14,33	0	-	Buen candidato
	C2	4008	4412					
	ZNA	5144	5530					
<b>COL 51</b>	C1	4192	4212	Parado	-	-	-	Parado
	C2	4472	4614					
	C3	4910	5036					
	ZNA	5114	5988					
<b>COL 69</b>	C1	3303	3296	Produce ag	-	-	-	
	C2	3700	3706					
	C3	3980	3988					
	ZNA	5131	6311					

		TOPE	BASE		BOPD	BWPD	SCFD	
<b>COL 3</b>	C1	4075	4171	Produciendo	51,79	0	-	Buen candidato
	C2	4361	4546					
	D	5839	5855					
<b>COL 67</b>	B1	1778	2122	Produciendo	68,14	10,15	-	Buen candidato
	C1	3870	4172					
	C2	4238	4292					
<b>COL 40</b>	C1	3720	3778	Produciendo	26,5	0	-	Producción bruta
	C2	4014	4304					
	C3	4304	4450					
<b>COL 59</b>	C1	3940	4042	Produciendo	16,7	3,66	-	Buen candidato
	C2	4058	4395					
	C3	4688	4732					
<b>COL 45</b>	C1	4150	4305	Produciendo	16	0	-	Buen candidato
	C2	4360	4689					
<b>COL 42</b>	B3	3468	3770	Produciendo	1,2	2,6	-	Esperando equipo
	C2	4563	4888					
	C3	5030	5041					
<b>CO 36</b>	B1	2061	2363	Produciendo	15	0	-	
	B2	3500	3492					
<b>COL 75</b>	C1	4540	4755	Produciendo	6,45	1,47	-	Baja producción
	C2	4796	5158					
	C3	5294	5398					
<b>COL 55</b>	C1	4646	4750	Produciendo	19,08	3,6	-	Buen candidato
	C2	4757	5142					
	C3	5318	5515					
<b>COL 56</b>	C1	4553	4856	Produciendo	14,51	3,75	-	Buen candidato
	C2	4902	5162					
	C3	5293	5391					
<b>COL 74</b>	C1	4336	4500	Produciendo	28,6	0	-	Buen candidato
	C2	4562	5020					
	C3	5140	5160					
<b>COL 37</b>	B1	3132	3366	Produciendo	6,4	2,73	-	Buen candidato
	B2	3562	3802					
	C1	4880	5134					
	C2	5192	5730					
	C3	5896	5972					

**FUENTE:** "ANÁLISIS DE FLUIDOS APLICADO A LOS HIDROCARBUROS EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO". VILLAREAL, Erika; MOYA, Helda. Tesis de grado. 2012.

Una vez se ha analizado cada uno de los pozos activos del campo en función a los criterios de selección dados anteriormente, se han preseleccionado 5 pozos mostrados en la tabla 2:

**Tabla 2. Pozos seleccionados**

<b>COL 3</b>
<b>COL 44</b>
<b>COL 45</b>
<b>COL 56</b>
<b>COL 74</b>

**FUENTE:** Autores

Los demás pozos han sido descartados debido a que algunos de ellos presentan problemas operacionales, problemas de arenamiento, producción intermitente, altos cortes de agua o no cumplen con las normas de seguridad correspondientes.

De los 5 pozos preseleccionados se decidió trabajar con el pozo Colorado 74, ya que se cuenta con información petrofísica detallada de la zona de interés del pozo, lo que permite la elaboración de un modelo característico del comportamiento del pozo por medio del simulador STARS.

- **Definición geológica del yacimiento**

El petróleo de Campo Colorado se extrae principalmente de la formación Mugrosa (Zonas B y C) y Esmeraldas (Zona D) de edad Oligoceno – Mioceno inferior, depositadas en un sistema fluvial meándrico. La trampa está conformada por un anticlinal alongado en dirección norte-sur limitado por una falla inversa al oeste en sentido N-S y que buza hacia el este. El pozo Colorado 74 extrae de la zona C2 de la formación Mugrosa. Las areniscas de las Formación Mugrosa se dividen en cuatro unidades operacionales con una porosidad promedio de 12,9% para la zona B1, 13,5% para B2, 15,7% para C1 y 19,6% para C2 (valor de porosidad que

se tomó para la elaboración del modelo del yacimiento)<sup>39</sup>. El yacimiento tiene una permeabilidad de 12 mD en promedio en la zona C2.

- **Potencial de flujo del pozo**

El pozo Colorado 74 se encuentra activo y produciendo de manera constante, garantizando un flujo uniforme. A fecha de agosto del 2012, el pozo estaba produciendo en promedio 28,6 BOPD, con una casi nula producción de agua.

### **3.3 GENERALIDADES DEL SIMULADOR DE PROCESOS TÉRMICOS STARS**

STARS es un simulador térmico, trifásico, multi-componente, desarrollado por la compañía canadiense Computer Modelling Group (CMG). La herramienta es implementada para la simulación de procesos térmicos en los yacimientos, tales como inyección de vapor, inyección de agua caliente, combustión in-situ, calentamiento eléctrico, y otros relacionados con la aplicación de energía térmica<sup>40</sup>.

#### **3.3.1 SIMULACION NUMERICA EMPLEANDO STARS**

La simulación numérica con STARS se inicia con la preparación e ingreso de los datos y propiedades y eventos del yacimiento. Existen dos maneras de ingresar estos datos, la primera mediante un archivo plano (.DAT) y la segunda mediante un programa con interfaz de Windows llamado Builder. De la primera manera, ingresando los datos en el archivo plano directamente, es necesario conocer las keywords, su forma y el orden en que se deben ingresar todos los datos del

---

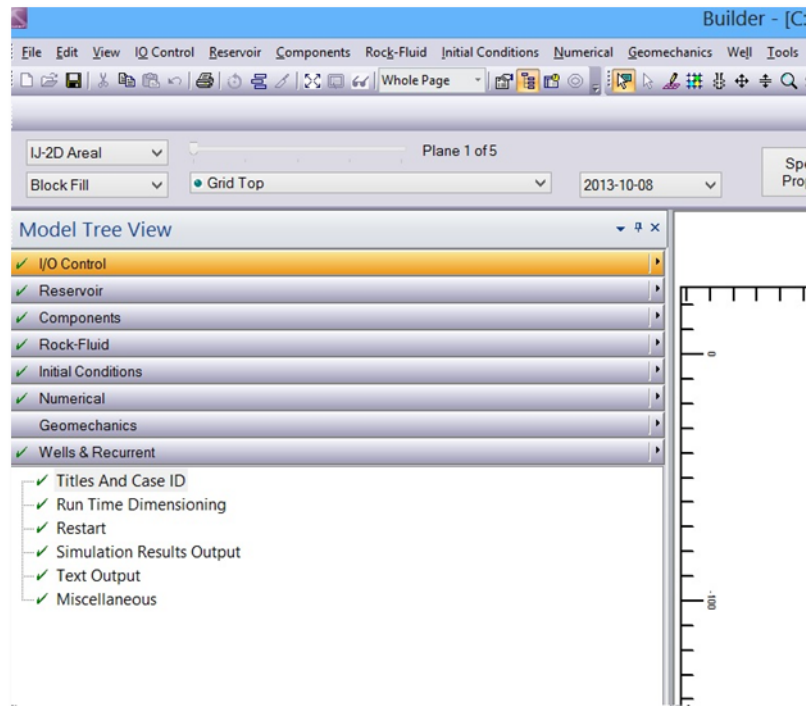
<sup>39</sup> ARIZA, Emiliano. "DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE CRISTALIZACIÓN DE LAS PARAFINAS EN EL CRUDO DE CAMPO COLORADO". Trabajo de grado para optar por título de Magister. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Hidrocarburos. Bucaramanga, 2005.

<sup>40</sup> MERCADO, Diana; RICARDO, Jesus. "ESTUDIO DE SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEM ROCA-FLUIDO DE UN YACIMIENTO DE CRUDO PESADO AL SER SOMETIDO A CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2005.

yacimiento. La segunda, en el Builder, donde mediante comandos y secciones más simples y ordenadas, el proceso de ingresar los datos del yacimiento, el pozo y los eventos, se agiliza.

El **Builder** está compuesto por 8 secciones, ver **Figura 16**: I/O Control, Reservoir, Components, Rock - Fluid, Initial Conditions, Numerical, Geomechanics, Well & Recurrent. (Estas secciones estarán descritas en el capítulo de ANEXOS del libro). En las cuales, se reúne la información necesaria para la construcción del modelo de simulación.

**Figura 16. Menú Builder Simulador STARS**



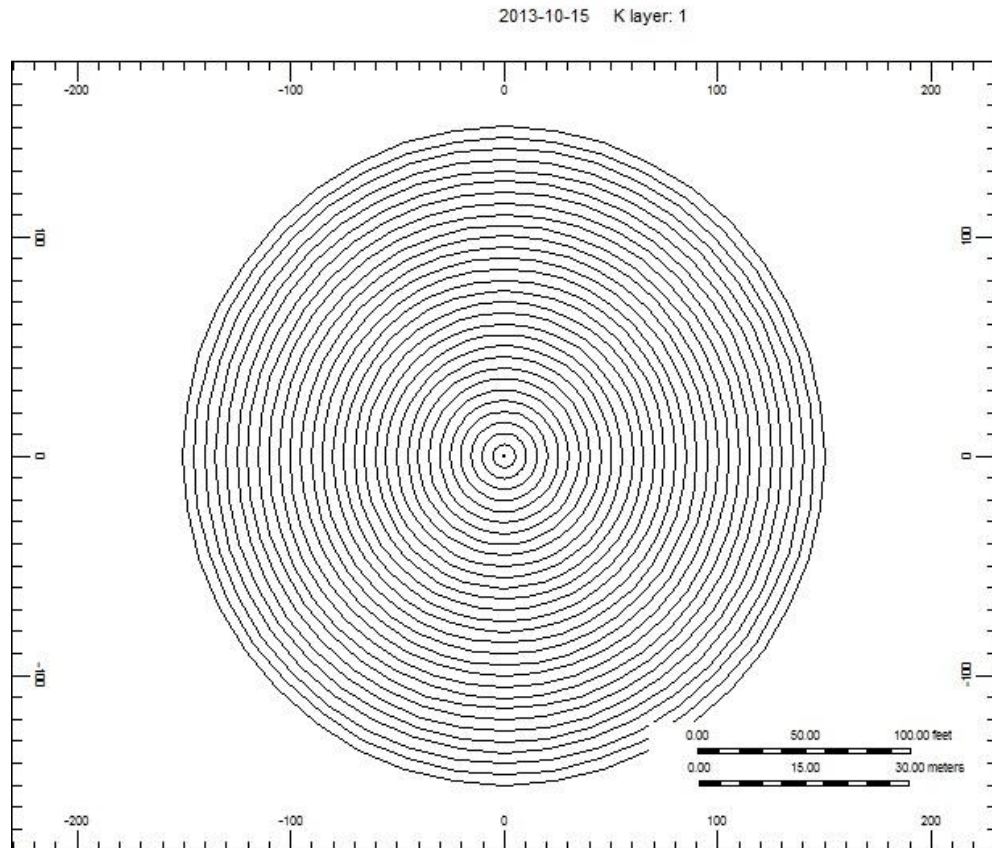
Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

### 3.3.1.1 CONSTRUCCION DEL GRID

El primer paso es la construcción del Grid, **Figura 17**, para ello es necesario conocer el área del pozo y discretizar el Grid según como sea necesario. Para

nuestro caso, el área del pozo va a ser de 70685 ft<sup>2</sup> (1.62 acres) y en este caso lo discretizamos en un enmallado radial con características de 30 divisiones en dirección i (cada división con espacio de 5ft de longitud) y 5 capas en dirección k; Teniendo un espesor neto productor de 35 ft, cada capa tiene una altura de 7 ft.

**Figura 17. Construcción Grid**

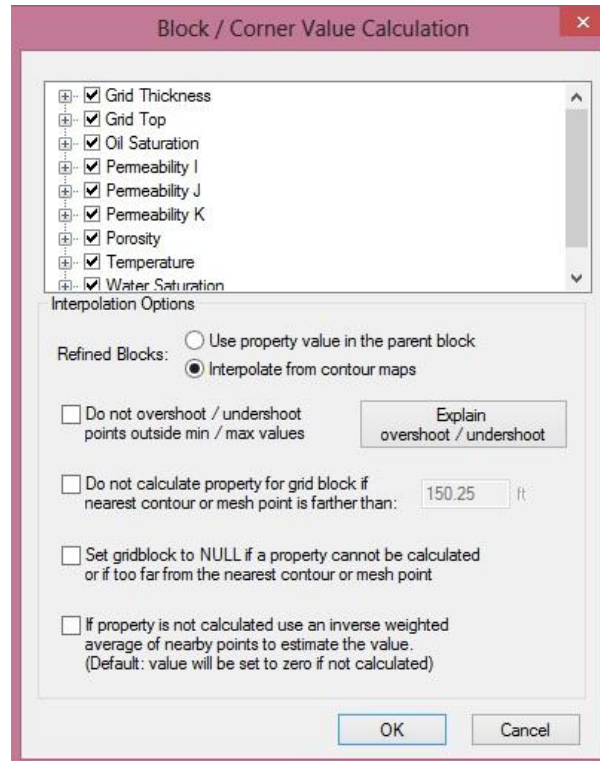


Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

El siguiente paso, es ingresar los datos básicos del yacimiento en “Array Properties”, tales como espesor de los bloques, profundidad de la capa superior, porosidad, permeabilidades en las distintas direcciones, etc<sup>41</sup>. Este procedimiento se puede observar en la **Figura 18**.

<sup>41</sup> Computer Modeling Group Ltd. CMG, “Advanced Process and Thermal Reservoir Simulator, User’s Guide STARS”. 2009

**Figura 18. Propiedades del Grid.**



Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

**Tabla 2. Características y Propiedades de la roca**

CARACTERISTICAS DEL ENMALLADO Y DEL POZO		
Profundidad	4500	Ft
Espesor h	35	Ft
Porosidad $\Phi$	0.19	-
Permeabilidad i Ki	12	Md
Permeabilidad j Kj	8	Md
Permeabilidad k Kk	5	Md
Saturación aceite So	0.7	-
Saturación agua Sw	0.3	-
Temperatura	174	°F
Conductividad Térmica	24	BTU/ft°F
Capacidad Calórica	35	BTU/ft°F
Compresibilidad Roca	5e-4	1/psi

Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

La longitud de los bloques fue elegida así debido a que el calentamiento y el cambio de temperatura se ve principalmente en los bloques cercanos al pozo, por esto, se eligió tener muchas divisiones para poder observar de mejor manera el radio (distancia) afectado por la energía eléctrica el cual produce un aumento en la temperatura<sup>42</sup>. Una vez construido el enmallado, se asignan las propiedades de la zona al modelo de simulación, como se muestran en la **tabla 2**.

Al ingresar las propiedades y características del yacimiento, se procede a ingresar en “Components” y crear el modelo del fluido a utilizar. Aquí, mediante tablas y correlaciones, se crea el modelo del fluido ingresando los siguientes datos<sup>43</sup>.

**Figura 19. Creación de modelo del fluido.**

#	p	Rs	Bo	Eg	viso	visg	co
	psi	ft3/bbl		ft3/bbl	cp	cp	1/psi
1	14.696	5.13965	1.05269	4.66164	3.00339	0.0112155	3e-005
2	210.916	43.4762	1.07029	69.3805	2.36005	0.0114941	3e-005
3	407.137	90.0474	1.09244	139.081	1.89738	0.0119141	3e-005
4	603.357	141.311	1.11765	214.279	1.57772	0.0124588	3e-005
5	799.577	196.011	1.1454	295.363	1.349	0.0131396	3e-005
6	995.797	253.465	1.17539	382.411	1.1789	0.0139754	3e-005
7	1192.02	313.238	1.20741	474.91	1.04806	0.0149858	3e-005
8	1388.24	375.026	1.2413	571.503	0.944551	0.0161837	3e-005
9	1584.46	438.6	1.27695	669.951	0.860724	0.0175677	3e-005
10	1780.68	503.786	1.31424	767.498	0.791495	0.0191179	3e-005

Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

<sup>42</sup> V. Peraser, S.L. Patil, S. Khataniar, A.Y. Dandekar, V.S. Sonwalkar, The University of Alaska Fairbanks. “Evaluation of Electromagnetic Heating for Heavy Oil Recovery from Alaskan Reservoirs”. SPE paper 154123. 2012.

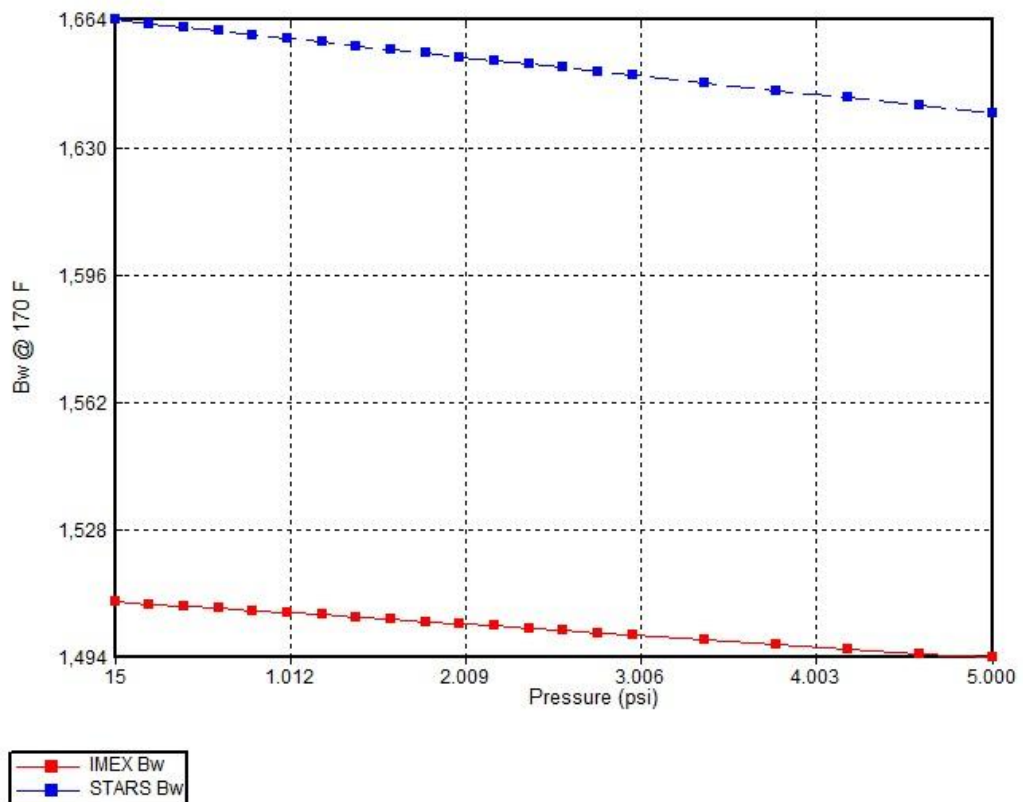
<sup>43</sup> Swapan Das, SPE, Marathon Oil Company, “Electro-MAGnetic Heating in Viscous Oil Reservoir”. SPE/PS/CHOA 117693 PS200-330. 2008.

**Tabla 3. Propiedades de los componentes.**

PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES		
Densidad del Aceite SC	53.35	Lb/ft3
Gravedad API	39	API
Compresibilidad del Aceite	5e-6	1/psi
Calor Especifico del Aceite	0.5	BTU/lb°R
Coefficiente Expansión térmica	3.7e-4	1/°F
Densidad del AguaSC	62.4	Lb/ft3
Factor volumétrico del Agua	1.5	BI/STB
Punto de burbuja del Aceite	2958	psi

Fuente: VILLAREAL, Erika; MOYA, Helda. "ANÁLISIS DE FLUIDOS APLICADO A LOS HIDROCARBUROS EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2012.

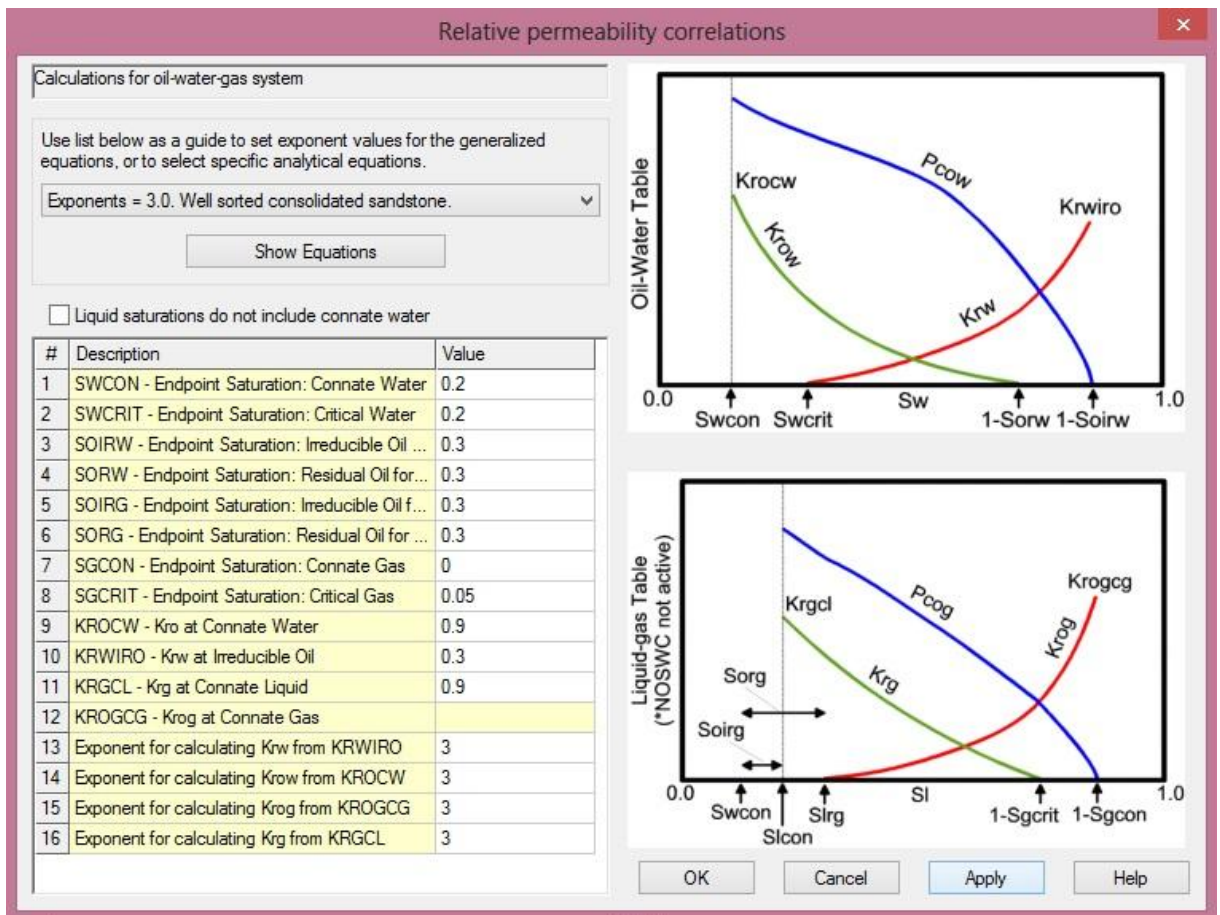
**Figura 20. Curvas modelo del fluido.**



Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

Ahora en “Rock-Fluid” se crean las curvas de permeabilidades relativas y de movilidad del fluido con respecto a la roca, tal como se muestra en la **Figura 21**. Para esto se usan de las correlaciones que trae el simulador, utilizando los datos de end points de las curvas de permeabilidad de estudios PVT de la interacción roca-fluido<sup>44</sup>, detallada en la **tabla 4**.

**Figura 21. End points modelo roca-fluido.**



Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

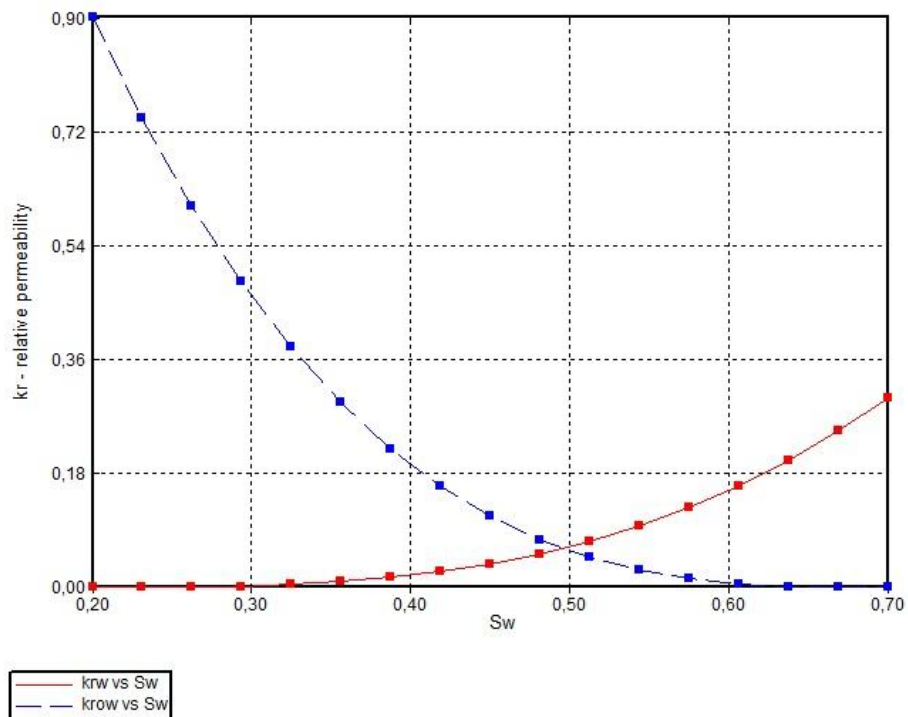
<sup>44</sup> Swapan Das, SPE, Marathon Oil Company, “Electro-MAGnetic Heating in Viscous Oil Reservoir”. SPE/PS/CHOA 117693 PS200-330. 2008.

**Tabla 4. Valores de end points.**

End Point	Valor
Saturación de agua connata (SWCON)	0.2
Saturación de agua crítica (SWCRIT)	0.2
Saturación de aceite irreducible al agua (SOIRW)	0.3
Saturación de aceite residual al agua (SORW)	0.3
Saturación de aceite irreducible al gas (SOIRG)	0.3
Saturación de aceite residual al agua (SORG)	0.3
Saturación de gas connata (SGCON)	0
Saturación de gas crítica (SGCRIT)	0.05
Permeabilidad relativa del agua @SORW (KRWIRO)	0.3
Permeabilidad relativa del aceite @SWCON (KROCW)	0.9

Fuente: VILLAREAL, Erika; MOYA, Helda. "ANÁLISIS DE FLUIDOS APLICADO A LOS HIDROCARBUROS EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2012.

**Figura 22. Curvas de Permeabilidad**



Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

En “Initial conditions” se requiere el dato de la presión de la formación, y datos de los contactos a la profundidad de referencia, **Figura 23**.

**Figura 23. Cuadro Condiciones Iniciales.**

STARS Initial Conditions

Vertical Equilibrium Calculation Methods

- Depth-Average Capillary-Gravity Method ( VERTICAL DEPTH\_AVE )
- Do Not Perform Vertical Equilibrium Calculations ( VERTICAL OFF )

Datum Depth for Pressure

Datum Depth for Output Pressure ( DATUMDEPTH) Depth:

- Use Initial Equilibrium pressure distribution to calculate corrected datum pressures. ( INITIAL )
- Use the grid block density to calculate corrected datum pressures. ( REFDENSITY GRIDBLOCK )
- Use an input reference density to calculate corrected datum pressures ( REFDENSITY density ) Density:

Initialization Region:

Region 1: Initialization Region Specifications

Initialization Set Number 1 is not defined. Grid depth range: 4500 to 4535 ft

Reference Pressure ( REFPRES ):

Location For Reference Pressure

- Reference Depth ( REFDEPTH )
- Reference Block ( REFBLOCK ) (UBA Format i.e. i1 j1 k1 / i2 j2 k2 ... )

Initial Reservoir Saturation

Water-Oil Contact Depth ( DWOC )

Gas-Oil Contact Depth ( DGOC )

Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

En “Numerical” se realizan los arreglos numéricos de la simulación, para optimizar los tiempos y pasos de simulación.

**Figura 24. Cuadro arreglos Numéricos.**

Keyword Description	Default Value	Dataset Value	Set At Time
<b>Timestep Control Keywords</b>			
Maximum Number of Timesteps (MAXSTEPS)	9999		
Maximum Time Step Size (DTMAX)	1e+020 day		
Minimum Time Step Size (DTMIN)	1e-008 day		
First Time Step Size after Well Change (DTWELL)		0.01 day	
Normal Variation per Time Step (NORM)			
Pressure (PRESS)	72.5189 psi		
Saturation (SATUR)	0.2		
Temperature (TEMP)	54 F		
Gas Mole Fraction (Y)	0.2		
Oil Mole Fraction (X)	0.2		
Water Mole Fraction (W)	0.2		
Oleic Component Global Mole Fraction (ZO)	0.2		
Noncondensable Gas Global Mole Fraction (ZNCG)	0.2		
Aqueous Component Global Mole Fraction (ZAQ)	0.2		

Comments for

OK Cancel Apply Help

**Fuente:** COMPUTER MODELING GROUP, Autores

En “Well & Recurrents” es donde se procede a perforar el pozo, ubicándolo en el Grid y colocándole las respectivas condiciones de operación. Como se puede ver en la **Figura 25**.

Para el modelo que se está elaborando, se coloca una restricción en la tasa de flujo de 30 BBls/d (aproximadamente producción actual) y un BHP (Bottom Hole

Pressure) de 1350 psi. Aproximación resultante del cálculo de la presión hidrostática con el peso de la columna actual.

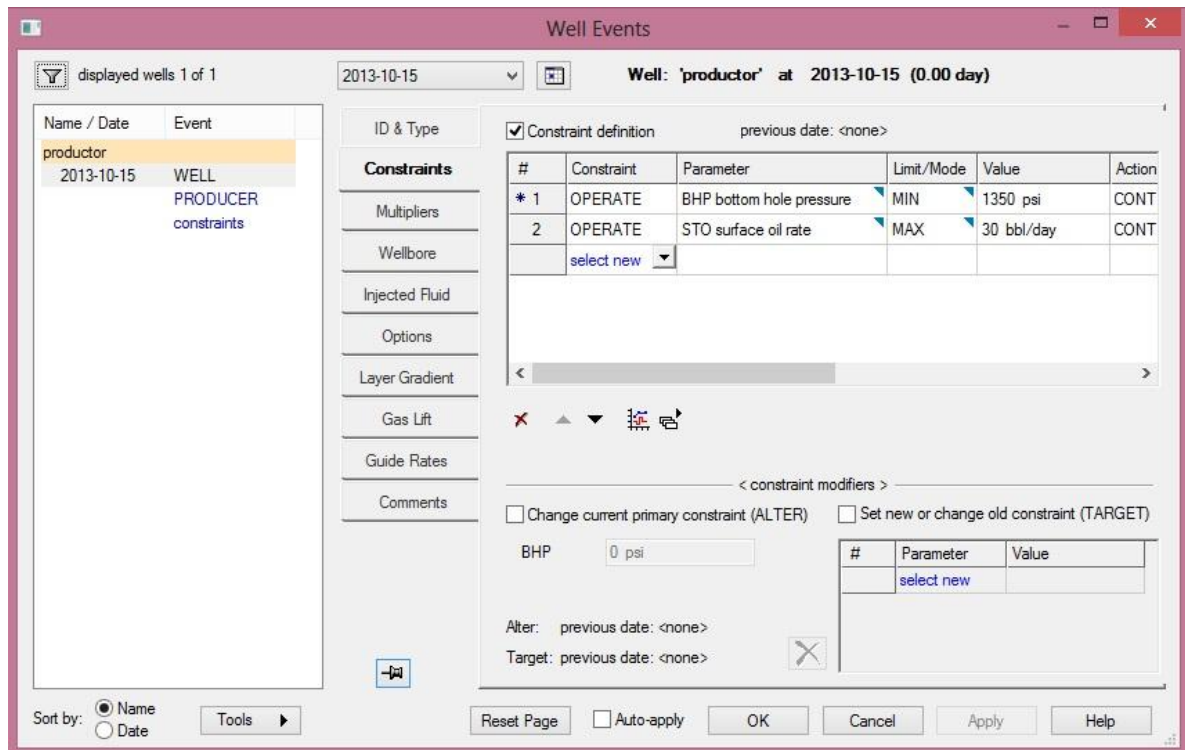
**Figura 25. Eventos del pozo**

The screenshot shows the 'Create New Well' dialog box. The 'Name' field is set to 'Well-1'. The 'Add multiple wells numbered' checkbox is unchecked, with '1' and '10' entered in the adjacent boxes. The 'Type' is set to 'Undefined' and the 'Group' is set to '<None>'. The 'Fraction' checkbox is unchecked with '0' in the box. The 'Simulation start date' and 'Definition date' are both set to '2013-10-15'. The 'Add wells using a drilling schedule of' checkbox is unchecked, with '1' and '2' in the boxes. The 'Add new well', 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons are visible at the bottom.

**Fuente:** COMPUTER MODELING GROUP, Autores

Ahora se procede a colocar el tiempo estimado para la simulación en la sección "Dates" de "Wells & Recurrent". Para este caso, y debido a la caída de presión y depletamiento de la zona, se estimará un tiempo de simulación de 1 año y 5 meses.

**Figura 26. Perforación y controles del pozo.**



Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

### 3.3.2 CARACTERÍSTICAS DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO DEL SIMULADOR STARS

El módulo de calentamiento eléctrico de STARS aún no ha sido acoplado a ninguno de los preprocesadores que existen en la interfaz del Builder, por esto, debe ser activado mediante palabras claves o “keywords” en el archivo plano de entrada. Inicialmente la construcción y preparación del modelo de simulación es construido en el Builder y luego el archivo de entrada es llevado al block de notas para allí ingresar la parte del calentamiento eléctrico.

El calentamiento eléctrico en STARS se habilita mediante la keyword “ELECHEAT”, la cual debe ser introducida en la sección de descripción del

yacimiento. Con esta keyword se activa el calentamiento eléctrico pero también deben utilizarse otras para su funcionamiento<sup>45</sup>.

En la sección de Yacimiento:

- 1) \*ELECHEAT activa la opción de calentamiento eléctrico. \*ELECTYPE y \*ELTYPE son opciones para establecer las propiedades de la roca y asignar el tipo de roca. \*VOLTOL, \*VOLSHF y \*EHEATCYC son controles de convergencia.

\*ELECTYPE define el número de set de propiedades de calentamiento eléctrico de la roca, empezando en 1 e incrementando en 1 por cada set de roca.

\*ELTYPE asigna a los bloques del grid, el tipo de roca especificado en \*ELECTYPE

Las siguientes keywords pueden ser especificadas para cada set de roca como:

- 2) \*ELCONTAB: Especifica la conductividad del agua, roca, sólidos y aceite como una función de la temperatura en una tabla de Temperatura y el valor de conductividad eléctrica.
  - \*TEMMULT: Especifica la dependencia de la conductividad respecto a la temperatura, donde a cada temperatura posee un multiplicador de conductividad respectivo.
  - \*ALITHO: Especifica el parámetro litológico de Archie. DEFAULT: 0.88
  - \*ATORTU: Especifica el parámetro de tortuosidad de Archie. DEFAULT: 1.37

---

<sup>45</sup> Computer Modeling Group Ltd. CMG, "Advanced Process and Thermal Reservoir Simulator, User's Guide STARS". 2009

- \*ASATUR: Especifica el parámetro de Archie de la saturación de agua.  
DEFAULT: 2
- \*ELTYPE asigna el tipo de roca especificado en \*ELECTYPE a los respectivos bloques del Grid.
- \*VOLTOL especifica la tolerancia de convergencia para el potencial eléctrico (voltios). Debido a la naturaleza de la ecuación de corriente eléctrica (no términos de acumulación), el voltaje usualmente se converge en una iteración. Aun así, el cambio en el valor raramente tiene algún efecto. DEFAULT: 10 V.
- \*VOLSHF especifica el cambio numérico para el potencial eléctrico (voltios). Debe ser alrededor de 10e-4 voltios. DEFAULT: 10e-3 V.
- \*EHEATCYC especifica el último número del ciclo de Newton al cual la tasa de calor es subida. Un valor de 1 corresponde a un modo explícito, el cual es más estable.
- \*ECONDWI especifica la conductividad eléctrica del agua en dirección a los bloques del grid. Ingresando el valor en dirección i el simulador colocará por DEFAULT los valores en dirección j y k, los cuales serán iguales al valor en i<sup>46</sup>.

El archivo plano de la programación se encontrará en la sección de ANEXOS.

En la sección de Well and Recurrent Data:

\*ELBOUND y \*ELTARGET especifican las condiciones de los límites eléctricos y los parámetros operacionales.

\*ELBOUND se llama una zona específica entre comilla sencilla ('name'). Es la posición de un bloque o la reunión de varios bloques colocando un límite eléctrico del potencial permitido.

---

<sup>46</sup> Computer Modeling Group Ltd. CMG, "Advanced Process and Thermal Reservoir Simulator, User's Guide STARS". 2009

Se define como un conjunto de caras de bloques del grid el cual se encuentran al mismo voltaje y a través de los cuales la corriente eléctrica fluye desde y hacia el yacimiento. De esta manera se genera la diferencia de potencial que permite el flujo de corriente eléctrica en el medio poroso.

\*ELTARGET \*POTENCIAL Establece el potencial para el limite específico y no le permite exceder este valor. Es necesario asignar un límite eléctrico de la tierra delimitando con una potencia de 0 V (cero voltios).

\*ELTARGET \*CURRENT Produce un máximo de corriente (amperios) para el limite indicado. En este caso se activa para el límite del electrodo, que será donde la corriente llegará.

\*ELTARGET \*POWER Produce la máxima energía aplicada (calentamiento eléctrico en tasa de kW) para todo el grid.

Los valores utilizados, están basados de la literatura de Calentamiento Eléctrico Resistivo, diferentes papers referente a diferentes pruebas y tipos de trabajos alrededor del mundo. Aparte de ello, estos valores se pusieron a prueba, ya que no se podían exceder los límites donde el calentamiento fuera tal que evaporara el agua intersticial de la roca. Es el agua intersticial es la que permite la conductividad de la corriente por inducción y por ende, el calentamiento depende de esta agua. Si no se controla la energía aplicada al yacimiento puede evaporar el agua intersticial haciendo que no exista conductividad de la corriente y por ende no halla transferencia de calor a lo largo del yacimiento.

Además de esto, el calentamiento se centraría en un solo punto, llamado como "Punto Caliente" produciendo así un aumento de temperatura tan grande que podría llegar a fusionar (derretir) la roca disminuyendo así la porosidad y permeabilidad de la zona. Este "problema" se tratara más específicamente y se

explicará de mejor manera en el capítulo 4 en donde se trataran diferentes casos<sup>47</sup>.

Como nota adicional, se debe decir que STARS trabaja el calentamiento eléctrico con una corriente eléctrica de frecuencia de 60 Hz, conocida como baja, si el usuario desea trabajar altas corrientes deberá determinar las longitudes de onda teniendo en cuenta las conductividades de la zona<sup>48</sup>.

---

<sup>47</sup> Swapan Das, SPE, Marathon Oil Company, "Electro-MAgnetic Heating in Viscous Oil Reservoir". SPE/PS/CHOA 117693 PS200-330. 2008.

<sup>48</sup> MERCADO, Diana & GONZALO, Jesus. "Estudio de simulación para la evaluación del comportamiento del sistema roca-fluido de un yacimiento de crudo pesado al ser sometido a calentamiento eléctrico resistivo". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga 2005.

## 4. RADIO CALENTADO DEL POZO PRODUCTO DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

El proceso de calentamiento eléctrico resistivo se basa en la transferencia de la energía eléctrica a través del yacimiento utilizando como medio de transferencia el agua connata e intersticial del yacimiento.

### 4.1 FACTORES QUE AFECTAN EL RADIO CALENTADO

Para una buena transferencia de energía se deben tener en cuenta ciertos factores que afectaran positiva o negativamente, el radio calentado, de ellos dependerá una buena transferencia de la energía y por ende del calor.

- **Evaporación del agua del yacimiento**

Si la energía aplicada al yacimiento (corriente) es muy alta, puede evaporar el agua intersticial del yacimiento, deteniendo así, el flujo de la corriente a través del agua y por ende, reduciendo la transferencia de energía para el yacimiento. También crearía un problema a nivel de la roca, ya que al evaporarse el agua intersticial de una zona, esta acumulará gran cantidad de energía (temperatura) allí –ya que no permite transmitirse de igual forma- produciendo lo que se conoce como punto caliente (hot spot). Una zona en la cual toda la energía se acumularía, aumentando rápida y significativamente la temperatura afectando la integridad de la roca debido a su coeficiente de expansión eléctrica<sup>49</sup>.

- **Coeficiente de Expansión Térmica**

Continuando el problema que se crea debido a la evaporación del agua intersticial, se debe tener en cuenta el coeficiente de expansión térmica. En general, el incremento de la temperatura de cualquier material produce un aumento de su

---

<sup>49</sup> Swapan Das, SPE, Marathon Oil Company, "Electro-MAgnetic Heating in Viscous Oil Reservoir". SPE/PS/CHOA 117693 PS200-330. 2008.

volumen. Esto se debe a que la energía térmica absorbida induce un incremento en las vibraciones de los átomos constitutivos de la materia, agrandando las distancias interatómicas. Este fenómeno se describe como expansión volumétrica de origen térmico a presión constante, o simplemente expansión térmica, y su medida se realiza en términos del coeficiente de expansión térmica. Este coeficiente representa el incremento relativo de volumen producido al aumentar la temperatura en un grado a presión constante<sup>50</sup>.

Debido a esto, se debe tener en cuenta la cantidad de energía que se aplicara el yacimiento, ya que se busca calentar el crudo hasta un punto donde no evapore el agua intersticial del yacimiento produciendo puntos calientes. Además producirá un efecto negativo en la transferencia de calor al yacimiento ya que la conductividad de la roca no será igual a la del agua, quiere decir esto, seguirá existiendo transferencia de calor debido a que la corriente se transferirá por la roca, no por el agua (debido a que no existe tal), pero el efecto de transferencia de calor y energía no será tan eficiente como debería serlo. Más adelante se observará un caso donde este fenómeno sucede.

- **Presión de fondo fluyente**

La presión de fondo afecta el radio calentado de manera que ha mayor presión en fondo será mejor la transferencia de energía. Esto debido a que la depleción del yacimiento es controlada y no tan drástica, permitiendo y dando un tiempo mayor para q la onda de transferencia eléctrica fluya a través del fluido que está saliendo, y se pueda expandir en mayor calidad a lo largo del radio del pozo. En esto también influye implícitamente, la viscosidad del crudo, ya que un crudo de mayor

---

<sup>50</sup> Coeficiente de Expansión Térmica

<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>. Propiedades de las rocas.

viscosidad, su movilidad y por ende la producción de este será menor, permitiendo una mayor transferencia de la energía para las zonas más lejanas al electrodo<sup>51</sup>.

Cabe decir de nuevo, que el Calentamiento Eléctrico ha sido concebido principalmente como una técnica de estimulación que afecta la zona adyacente al pozo productor, más que como una técnica de recobro en la cual se encuentran involucrados múltiples pozos dentro del proceso<sup>52</sup>.

El objetivo número uno de este trabajo es realizar un estudio en la transferencia de energía (calor) a lo largo del yacimiento.

## 4.2 SENSIBILIZACION DEL RADIO CALENTADO

En todo proceso de debe buscar la optimización de los procesos, donde estos, presentado la menor cantidad de problemas posibles, arrojen los mejores resultados, a la mejor relación costo/inversión. Para esto diseñamos tres casos de sensibilización para el pozo en donde se trataran los puntos críticos para el sistema. Conociendo que para el proceso de sensibilización, sólo será posible la manipulación en variables ajenas a las características propias del yacimiento y de los fluidos, por ello, nuestra sensibilización se basará en la cantidad de energía transmitida al yacimiento y cómo será su comportamiento uno respecto a otro.

El primero será un modelo base, con datos recomendados de pruebas de campos en campos de similares características, con una cantidad de energía recomendada según el modelo del yacimiento. Este se llamará de aquí en adelante como “**Modelo CE**”.

---

<sup>51</sup> Swapan Das, SPE, Marathon Oil Company, “Electro-MAGnetic Heating in Viscous Oil Reservoir”. SPE/PS/CHOA 117693 PS200-330. 2008.

<sup>52</sup> MERCADO, Diana & GONZALO, Jesus. “Estudio de simulación para la evaluación del comportamiento del sistema roca-fluido de un yacimiento de crudo pesado al ser sometido a calentamiento eléctrico resistivo”. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga 2005.

El segundo será un modelo maximizando los valores de energía aplicada al yacimiento, buscando obtener los efectos de evaporación del agua intersticial en los bloques cercanos al yacimiento. Se llamará “**Modelo CEmax**”.

El tercer modelo será minimizando los valores de energía aplicada al yacimiento, queriendo crear una mínima perturbación en la temperatura del yacimiento. Se llamará “Modelo CEmin”.

En la siguiente tabla se expondrán los parámetros para cada uno de los modelos.

**Tabla 5. Parámetros de aplicación de energía eléctrica a cada modelo.**

	<b>Modelo CE</b>	<b>Modelo CEmax</b>	<b>Modelo CEmin</b>
<b>Energía (POWER)</b>	70 kW	120 kW	7 kW
<b>Corriente (CURRENT)</b>	150 A	225 A	60 A
<b>Potencia (POTENTIAL)</b>	220 V	330 V	110 V

Fuente: Autores.

#### **4.2.1 Efecto en el Perfil de Temperatura**

El propósito, y objetivo más importante de este trabajo es la construcción de un perfil de temperatura el cual muestre la magnitud y el cambio en la temperatura producido por el calentamiento eléctrico a lo largo del radio del pozo. La transferencia de corriente eléctrica es la causa de que se produzca un cambio en la temperatura.

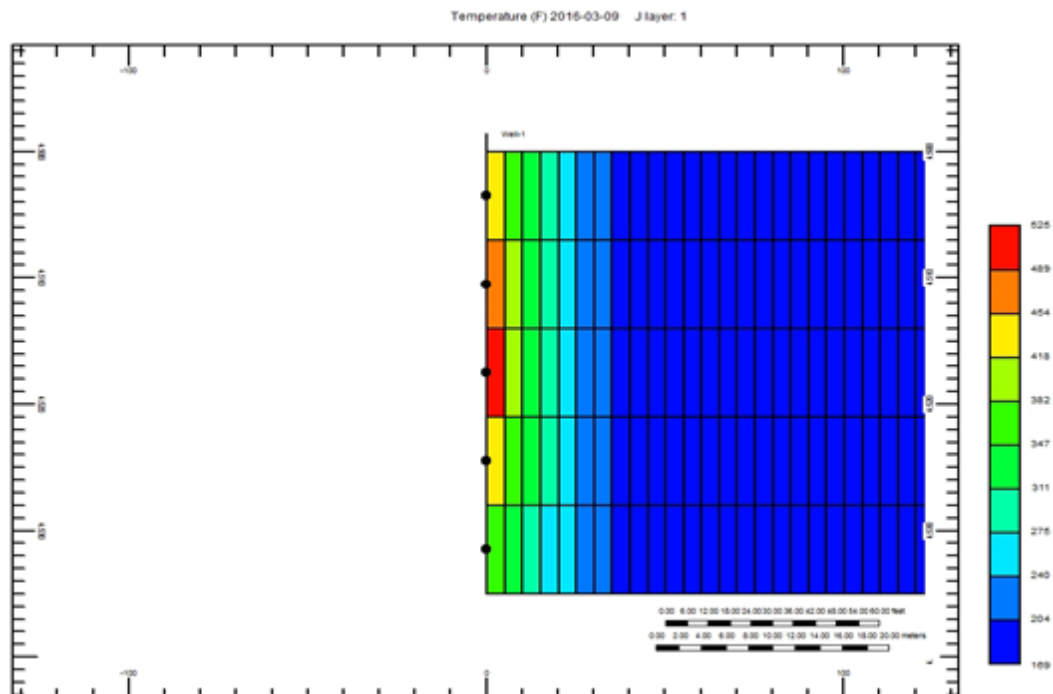
El efecto de la generación de calor en el yacimiento se ve reflejado en un aumento de la temperatura en la zona estimulada, en una proporción tal que las mayores temperaturas son alcanzadas en la región cercana al electrodo donde ocurre la mayor disipación de potencia.

Se observa que el calentamiento de la zona no es uniforme, ya que el perfil de temperatura está relacionado con la distribución del campo eléctrico generado por el electrodo, haciendo que dicho comportamiento sea característico para este tipo de procesos de estimulación térmica.

El aumento en la temperatura también genera una disminución en la viscosidad en las zonas cercanas al pozo, es decir, en las zonas de mayor afectación del calentamiento eléctrico, debido a la relación que la viscosidad tiene con el aumento de temperatura, produciendo también, una mejoría en la movilidad del crudo.

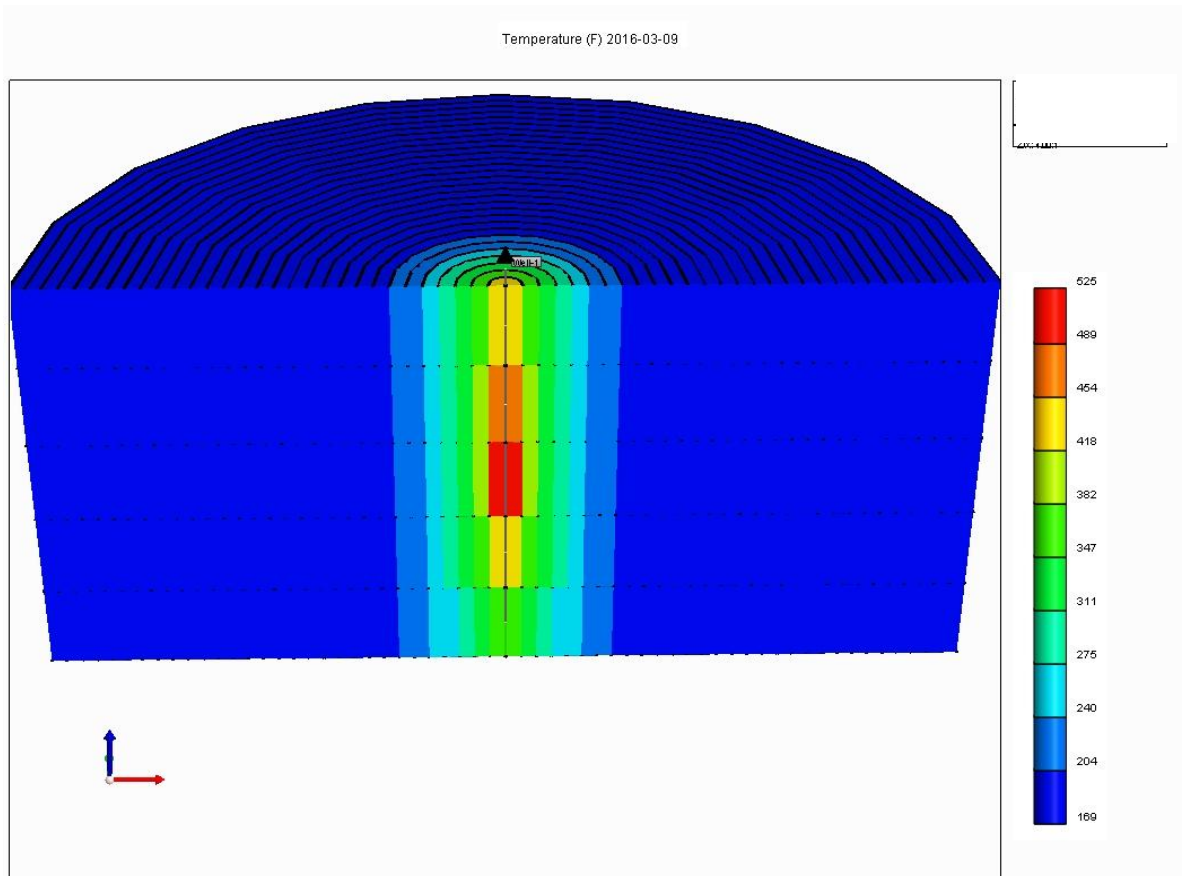
En el Modelo CE se observa el siguiente perfil de temperatura.

**Figura 27. Perfil de Temperatura en 2D con corte axial en dirección k. Modelo CE**



Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

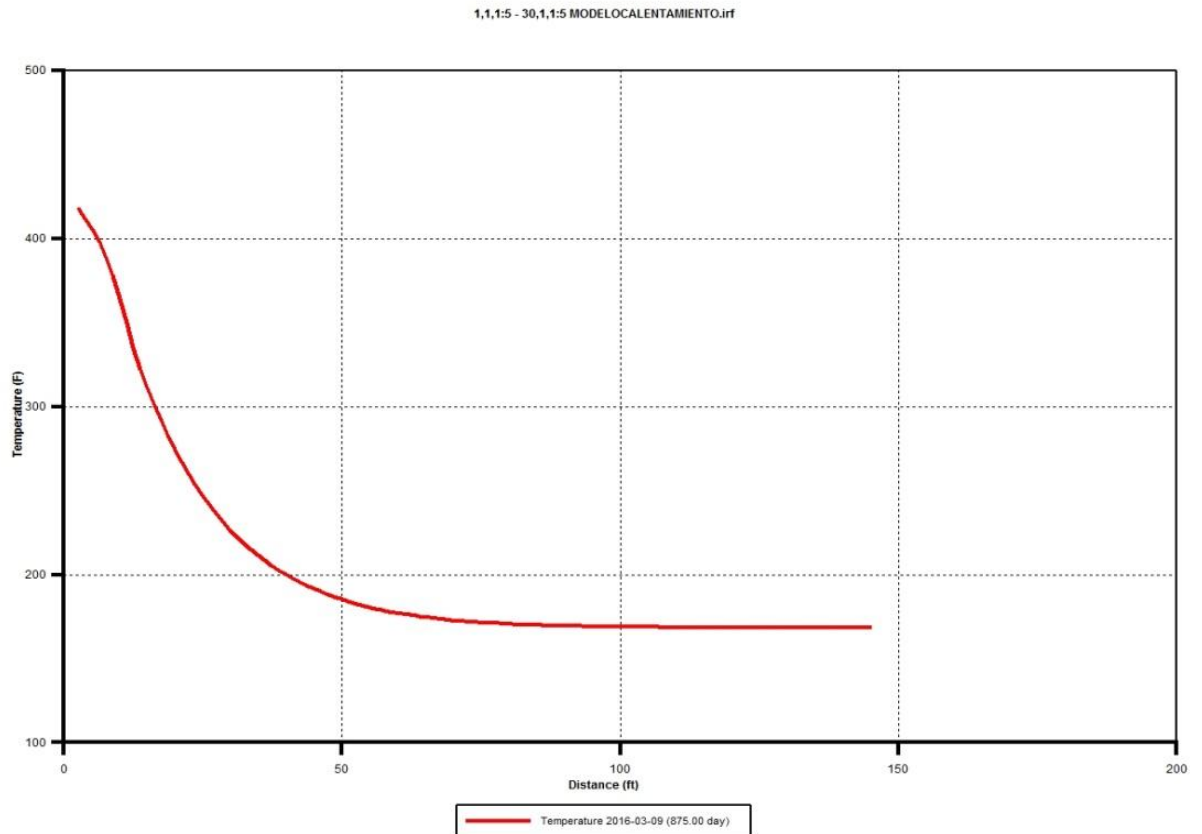
**Figura 28. Perfil de temperatura en 3D con corte axial en dirección k. Modelo CE**



Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

Como se observa en la **Figura 26** y la **Figura 27**, se ve la transferencia de energía reflejado en el cambio de temperatura en la zona más cercana al pozo, alcanzando un radio de afectación aproximado de 40 ft.

**Figura 29. Perfil de temperatura al final de la simulación en Modelo CE.**

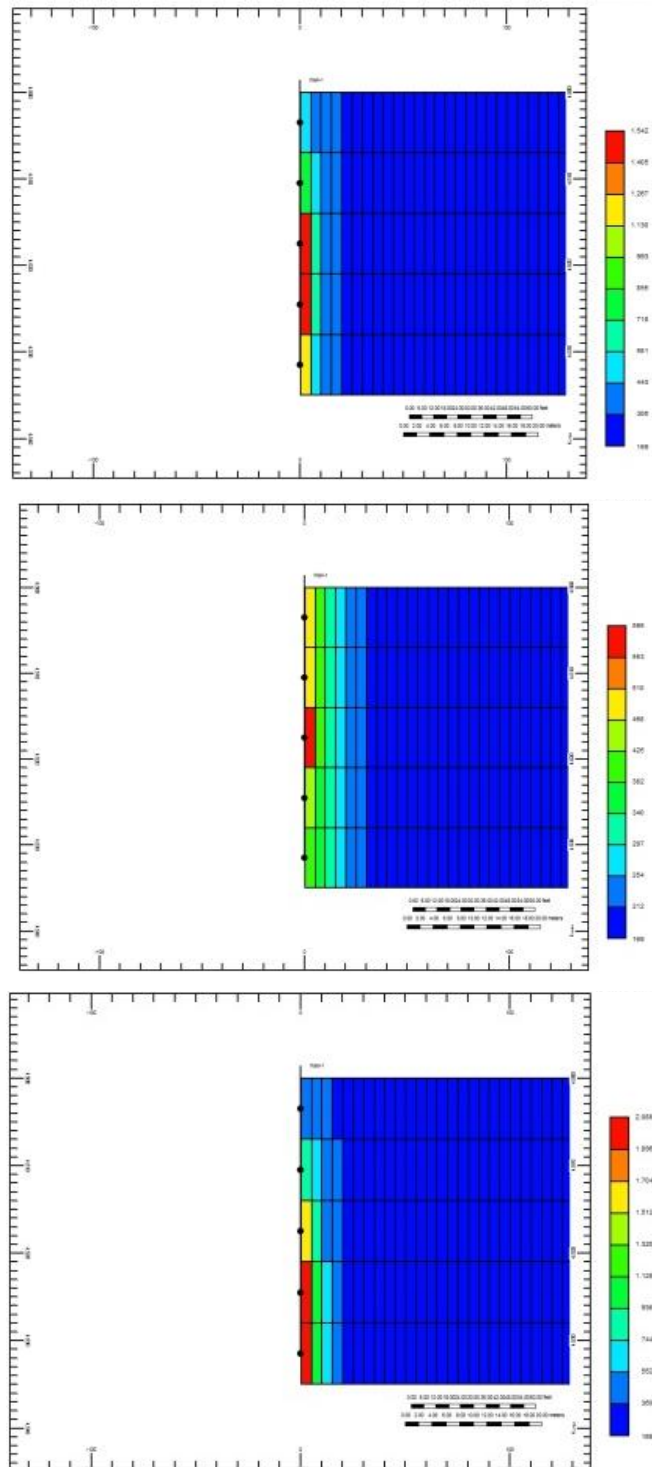


**Fuente:** COMPUTER MODELING GROUP, Autores

En la **Figura 28**, se nota con mayor facilidad la variación de la temperatura a lo largo del radio del pozo, observándose un aumento en la temperatura hasta más de los 50 ft.

En el **Modelo CEmax** se observó lo siguiente:

**Figura 30. Perfil de Temperatura en 2D corte axial en dirección k Modelo CEmax**

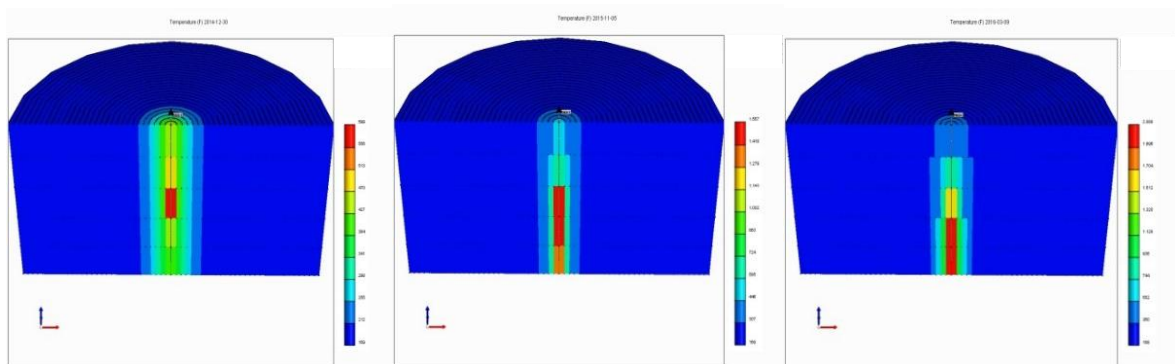


**Fuente:** COMPUTER MODELING GROUP, Autores

En la **Figura 30**, se observa como inicia y muy rápidamente el modelo produce una gran transferencia de energía y un aumento grande en la temperatura, pero como se observa en la **Figura 31**, se produce un estancamiento en la transmisibilidad de la energía acumulándola en los primero bloques adyacentes al pozo, sin producir una transferencia notable al resto de los bloques.

Debido, a que existe evaporación del agua intersticial de la zona, creando un “punto caliente” en la zona de los bloques del electrodo.

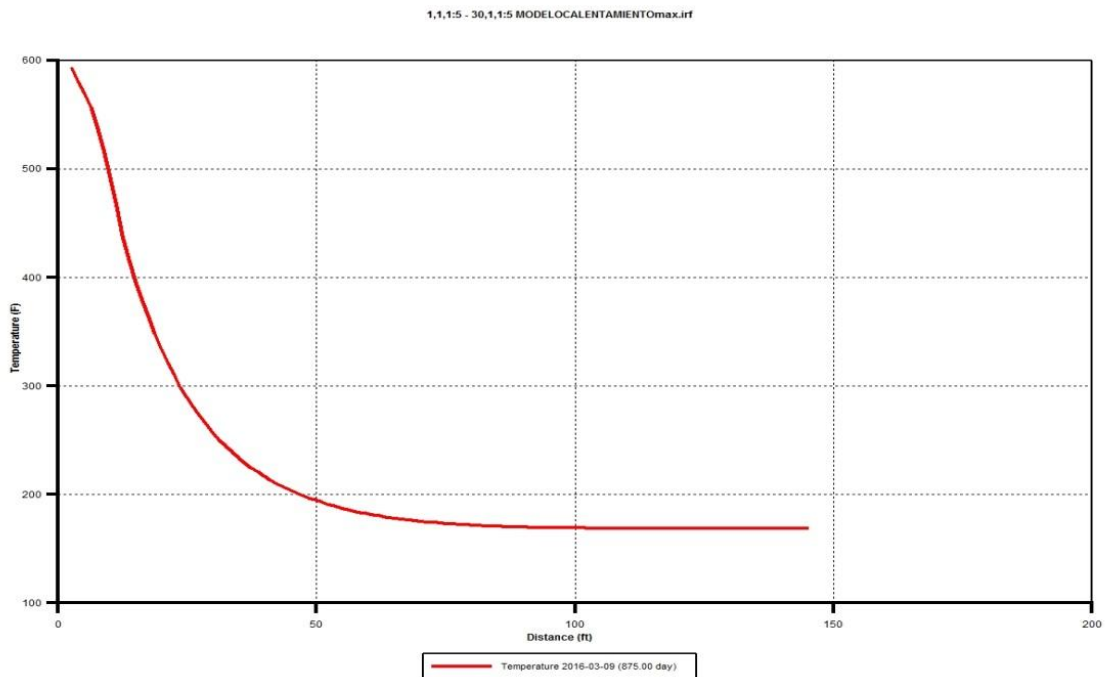
**Figura 31. Perfil de temperatura en 3D corte axial en dirección k Modelo CEmax**



Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

En la **Figura 31** se ve en los tres tiempos específicos, como la saturación de agua llevada a cero disminuye la transferencia de calor, creando puntos calientes.

**Figura 32. Perfil de temperatura al final de la simulación en Modelo CEmax.**



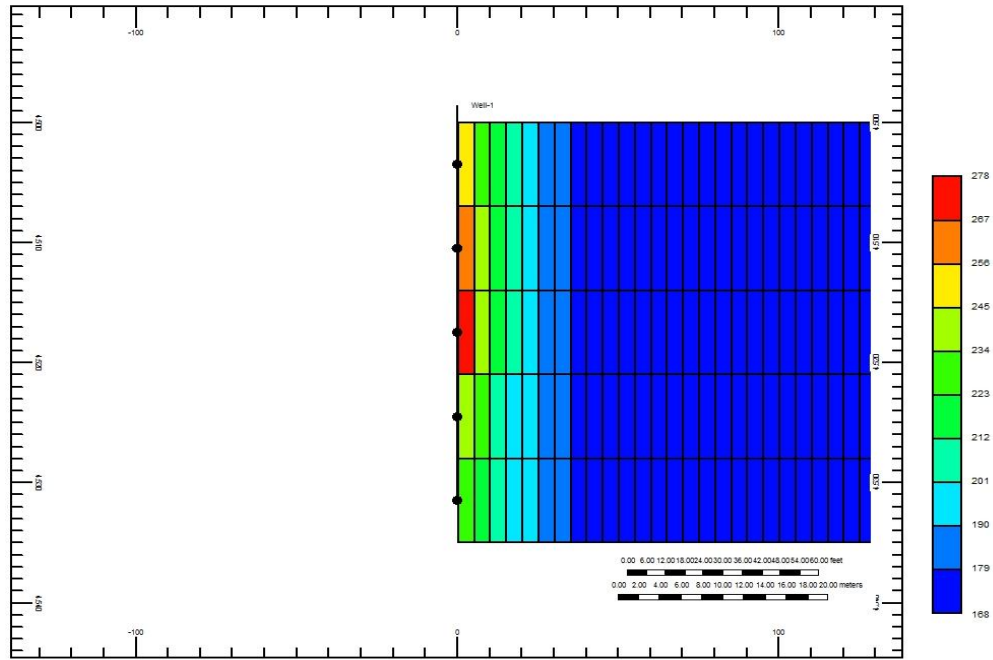
Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

A pesar de que la **Figura 32** muestra una mayor temperatura en el yacimiento, esta afecta y evapora el agua intersticial del yacimiento, disminuyendo su capacidad de transferencia de energía, sin mencionar también, el efecto negativo que tiene este aumento de temperatura tan alto en la formación debido a que produce una reducción en la porosidad del yacimiento, debido a la expansión térmica que se produce. También se debe decir, los problemas a nivel de equipos y materiales expuestos a estas temperaturas que podrían producirse.

En el Modelo **CEmin** se obtuvo los siguientes resultados.

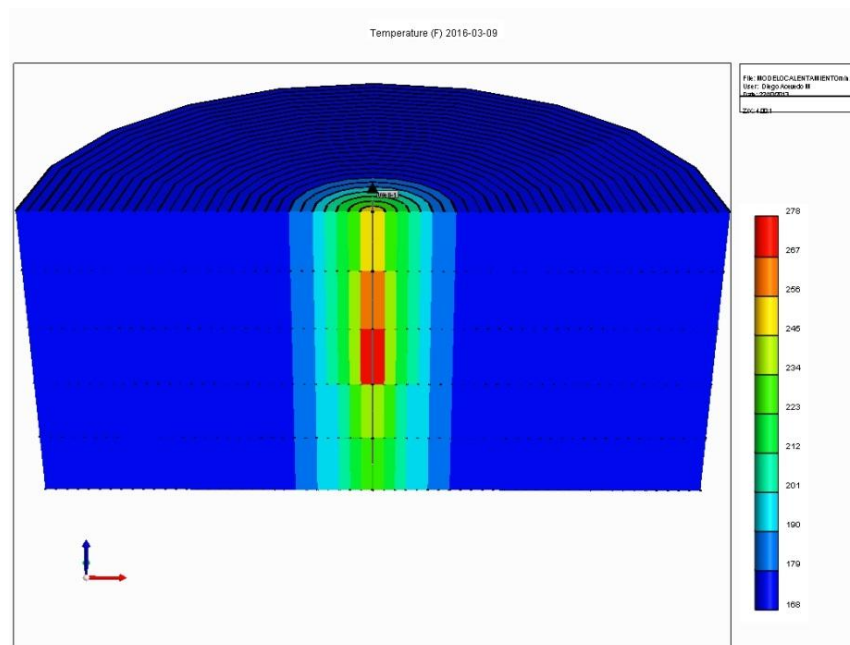
Debido a que es el modelo donde la aplicación de energía al yacimiento es menor, su afectación al yacimiento es también menor, reduciendo su radio de transferencia de energía y calor y produciendo un muy leve incremento en la temperatura.

**Figura 33. Perfil de Temperatura en 2D corte axial en dirección k Modelo CEmin**



Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

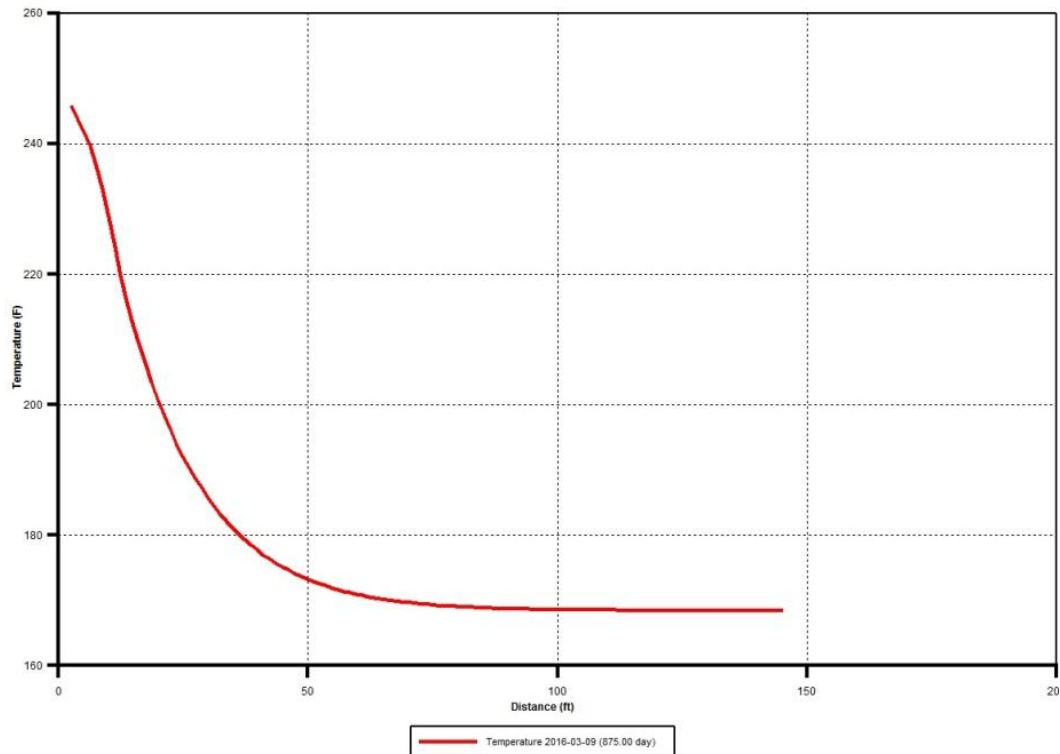
**Figura 34. Perfil de temperatura en 3D corte axial en dirección k Modelo CEmin**



Fuente: COMPUTER MODELING GROUP, Autores

En el perfil de temperatura de la **Figura 35**, se observara que su radio de afectación es la menor de todas, producto de que la energía aplicada es menor, mostrando también que el aumento en la temperatura no alcanza a ser muy significativo.

**Figura 35. Perfil de temperatura al final de la simulación en Modelo CEmin**



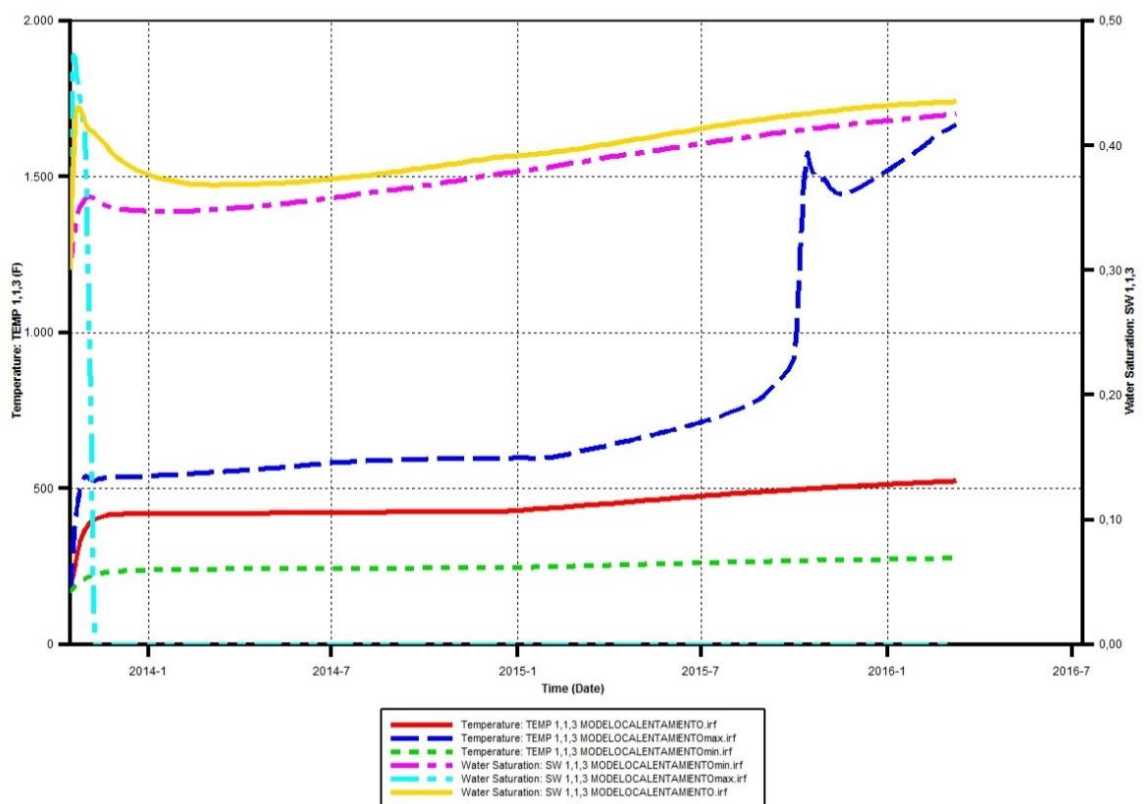
Fuente: Autores.

#### **4.2.2 Efecto en la Saturación de Agua respecto a la temperatura, en los bloques cercanos al pozo**

Como ya se mencionó anteriormente, la saturación de agua y la presencia de agua es muy importante para un proceso de calentamiento eléctrico resistivo, ya que depende de la conductividad del agua, la transferencia de energía hacia el yacimiento, debido a que la conductividad de la roca y del petróleo es tan baja, haciendo como primordial para la transferencia la conductividad del agua. Con

esto se debe decir, que un aumento abrupto de la temperatura, debido a la aplicación excesiva de energía, puede generar una evaporación del agua intersticial, creando puntos calientes, y no permitiendo, de manera efectiva, la transmisión de energía y calor a lo largo del yacimiento.

**Figura 36. Saturación de agua contra tiempo y Temperatura para los tres casos: Modelo CE, Modelo CEmax, Modelo CEmin.**



Fuente: Autores.

Se observa en la **Figura 36**, el bloque mayor alteración en la temperatura de todos los casos. Y se puede ver claramente, como en los modelos CE y CEmin, la temperatura no afecta la saturación de agua de la zona. Pero en cambio, si se ve que para el **Modelo CEmax** en un tiempo muy temprano, la temperatura produce

que la saturación de agua valla a cero, debido a la evaporación de la misma. Esto influirá, como ya se vio anteriormente, en la capacidad de transferencia de energía para el yacimiento, ya que esto creará un punto caliente en esta zona (Temperatura superior a los 1500°F) que nunca permitirá agua en esta zona y reduciendo la conductividad del yacimiento.

Esto se resume en que en el **Modelo CEmax** se está desperdiciando la energía aplicada, ya que como no existe buena conductividad de la corriente, toda la transmisión de energía la está recibiendo un solo punto o unos muy pocos, creando solo puntos o zonas calientes y no buscando lo que en realidad se busca hacer, una transmisión de energía a lo largo del yacimiento.

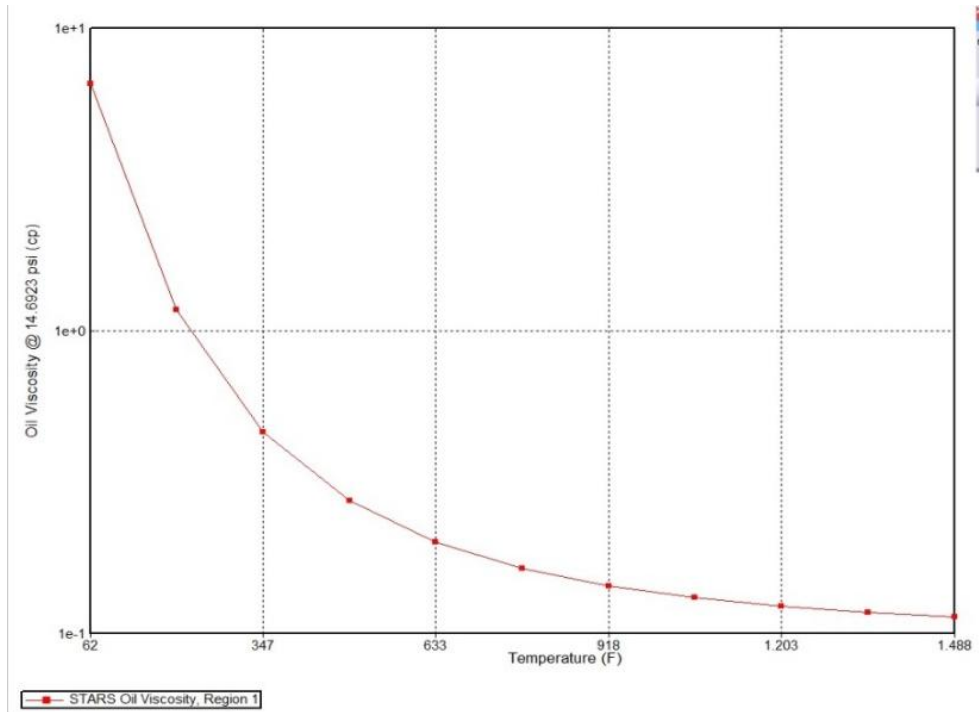
#### **4.2.3 Efecto en la Viscosidad respecto a la temperatura, en los bloques más cercanos al electrodo**

Se sabe que efecto que produce la temperatura en la viscosidad, es una relación inversa, en la cual, cuando la temperatura aumenta, la viscosidad disminuye. Modelo el cual está representado en sección “Components” en la construcción del modelo de simulación, mostrado en la **Figura 37**.

A partir de la viscosidad inicial, en la **Figura 38**, se observara como es afectada debido al aumento en la temperatura en la cara del pozo y el porcentaje de disminución de la misma.

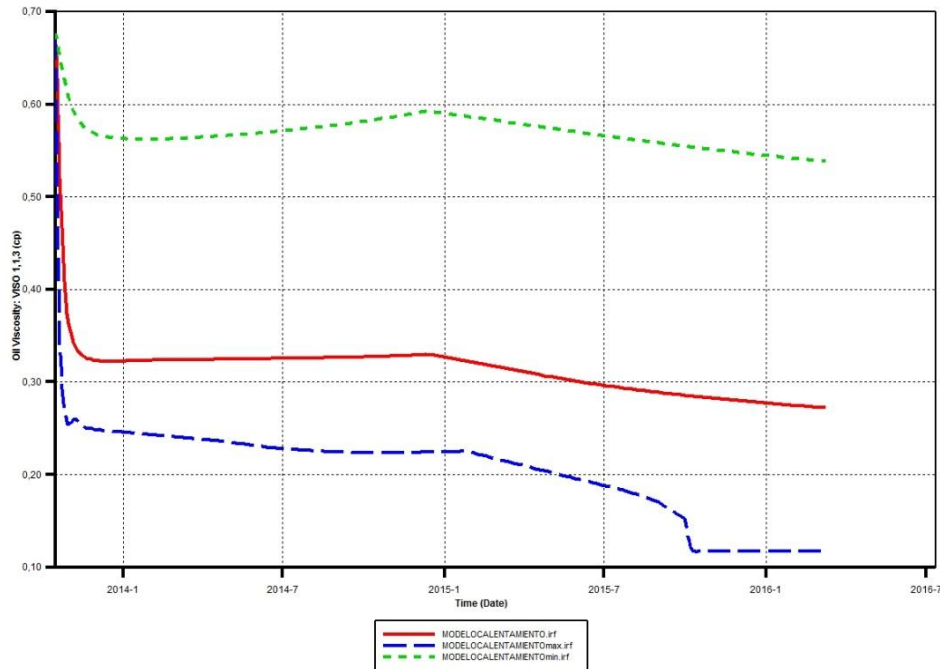
Debido al modelo inicial, y las características propias del Campo Colorado, la viscosidad del crudo es muy baja, por ende, el calentamiento producirá un cambio no tan significativo, como si se trabajara en un yacimiento con crudo más viscoso donde se podría observar mejor este cambio.

**Figura 37. Modelo de la viscosidad del fluido construido en el simulador.**



Fuente: Autores.

**Figura 38. Cambio en la viscosidad del crudo.**



Fuente: Autores

Empezando por el **Modelo CEmin**, la viscosidad a lo largo de la simulación, en la cara del pozo pasa de ser 0.69 cp hasta 0.54 cp; el **Modelo CE** paso de 0.69 cp hasta 0.27 cp; y el **Modelo CEmax** paso de 0.69cp hasta 0.12 cp, a lo largo de la simulación.

**Tabla 6. Variación en la viscosidad de los diferentes modelos.**

	<b>Viscosidad Final [cp]</b>	<b>% Disminución</b>
<b>Modelo CE</b>	0.27	73.69%
<b>Modelo CEmax</b>	0.12	82.60%
<b>Modelo CEmin</b>	0.54	21.73%

Fuente: Autores.

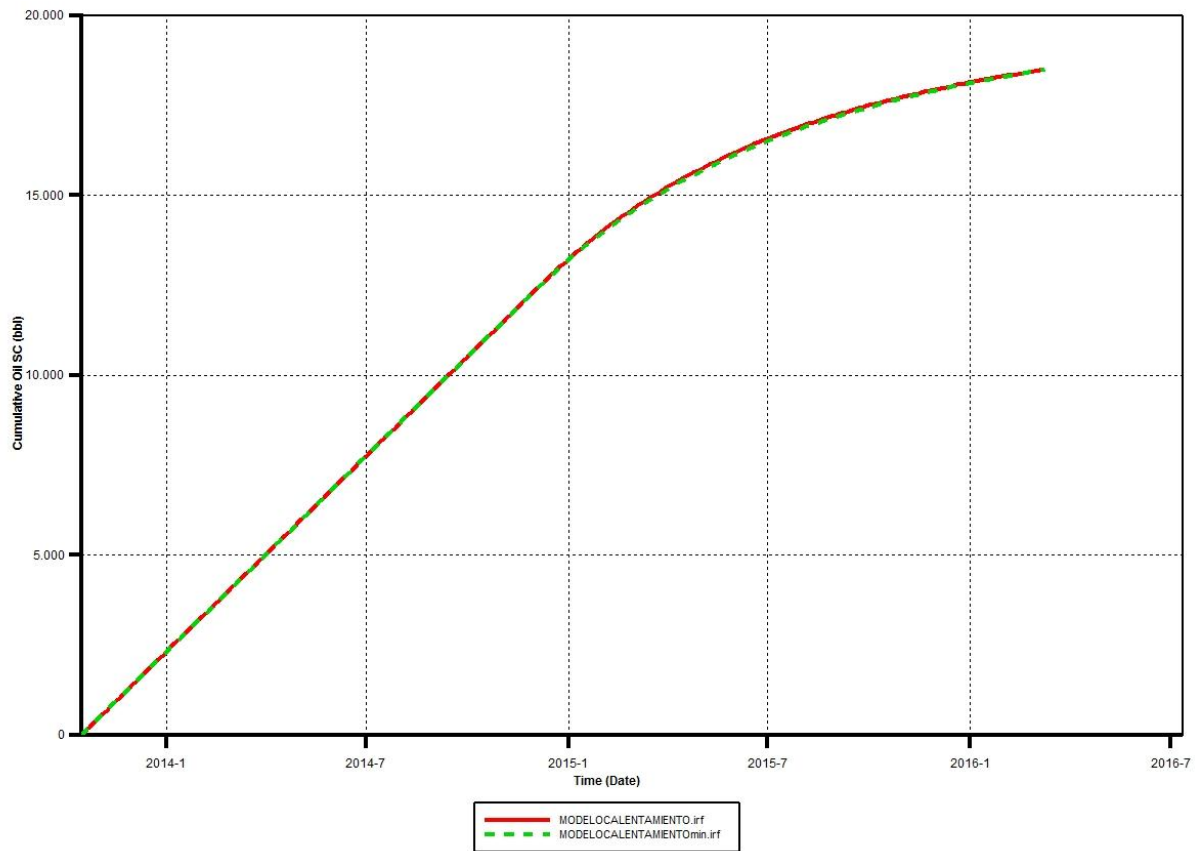
Observando la **tabla 6**, se puede concluir que el efecto del calentamiento es significativo porcentualmente hablando en la viscosidad. Esto podría relacionarse para un yacimiento con una viscosidad mayor y problemas de movilidad, en donde su efecto será mayor en el valor de la viscosidad final. En este caso, debido a que su valor inicial es muy pequeño, la variación es muy pequeña, y poco significativa para el aumento en la producción, como se observará más adelante.

#### **4.2.4 Efecto en la producción acumulada del pozo**

La movilidad del crudo, y por ende su producción, depende de diferentes factores, pero uno muy importante es la viscosidad. Al tratarse de un método térmico donde se busca inyectar energía, para aumentar la temperatura del crudo, debería existir una mejora significativa en la producción. Pero para este caso, no es tan significativa, debido a que el valor inicial de viscosidad es muy bajo, el cambio en esta es también muy bajo, como observamos anteriormente.

A continuación se presentara en la **Figura 39**, la producción acumulada para los tres casos, especificando, que el Modelo CEmax queda descartado, por los diferentes problemas anteriormente expuestos.

**Figura 39. Producción acumulada a lo largo de 825 días.**



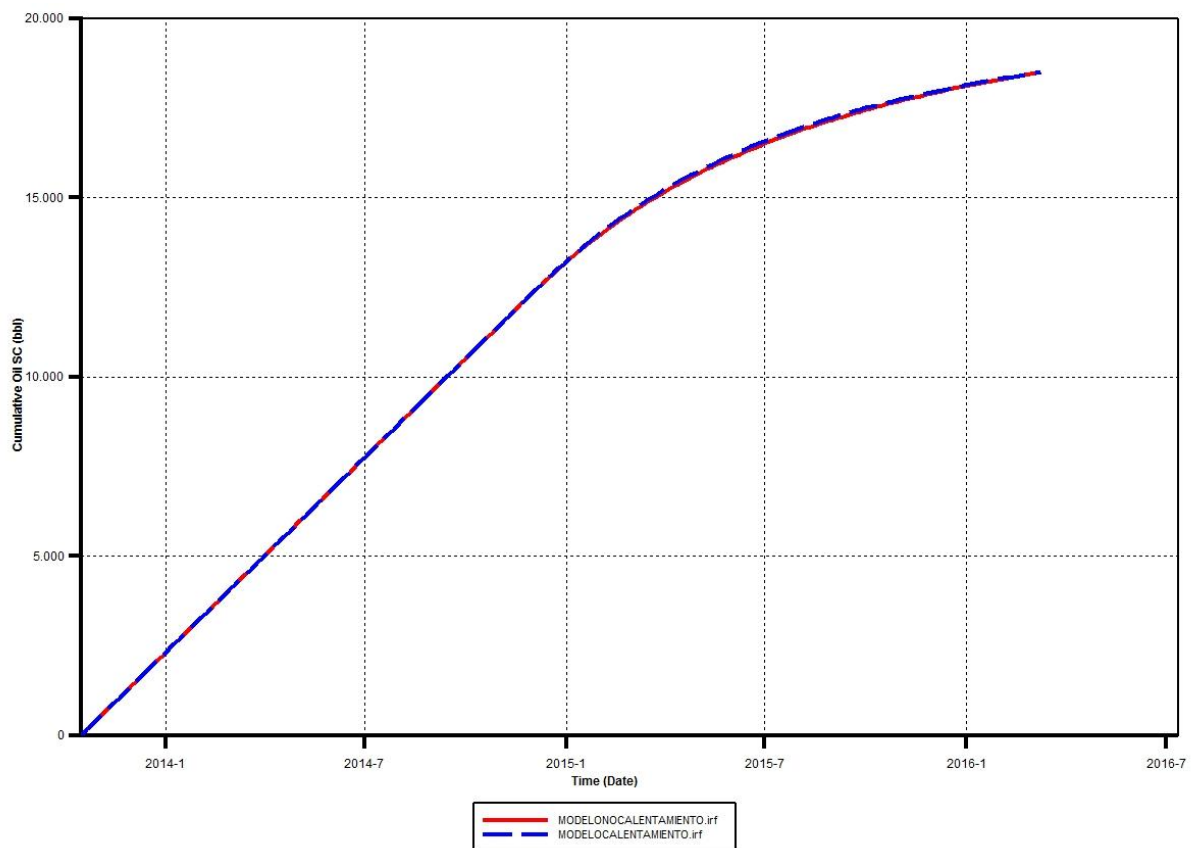
Fuente: Autores.

Al final de los 825 días de simulación se observa que el Modelo CE produce cerca de 18510 BIs y el Modelo CEmin 18458 BIs.

### 4.3 SELECCIÓN DEL MODELO PARA CÁLCULO DEL DUTY Y COSTO DE LA ENERGÍA EMPLEADA

Debido a la poca diferencia existente entre los modelos tratados, se elegirá el modelo sin problemas, que produjo mayor cantidad de petróleo a lo largo de la simulación, y el cual tuvo una mejor transferencia de energía y calor: **el Modelo CE**. Ya elegido el modelo con el cual se trabajará, se hará una comparación gráfica de diferentes aspectos, con el modelo del yacimiento sin calentamiento eléctrico, para calcular su producción incremental, y comparar parámetros como viscosidad y calcular el factor de recobro. Esta comparación es realizada en la siguiente **Figura 40**.

**Figura 40. Comparación producción acumulada**

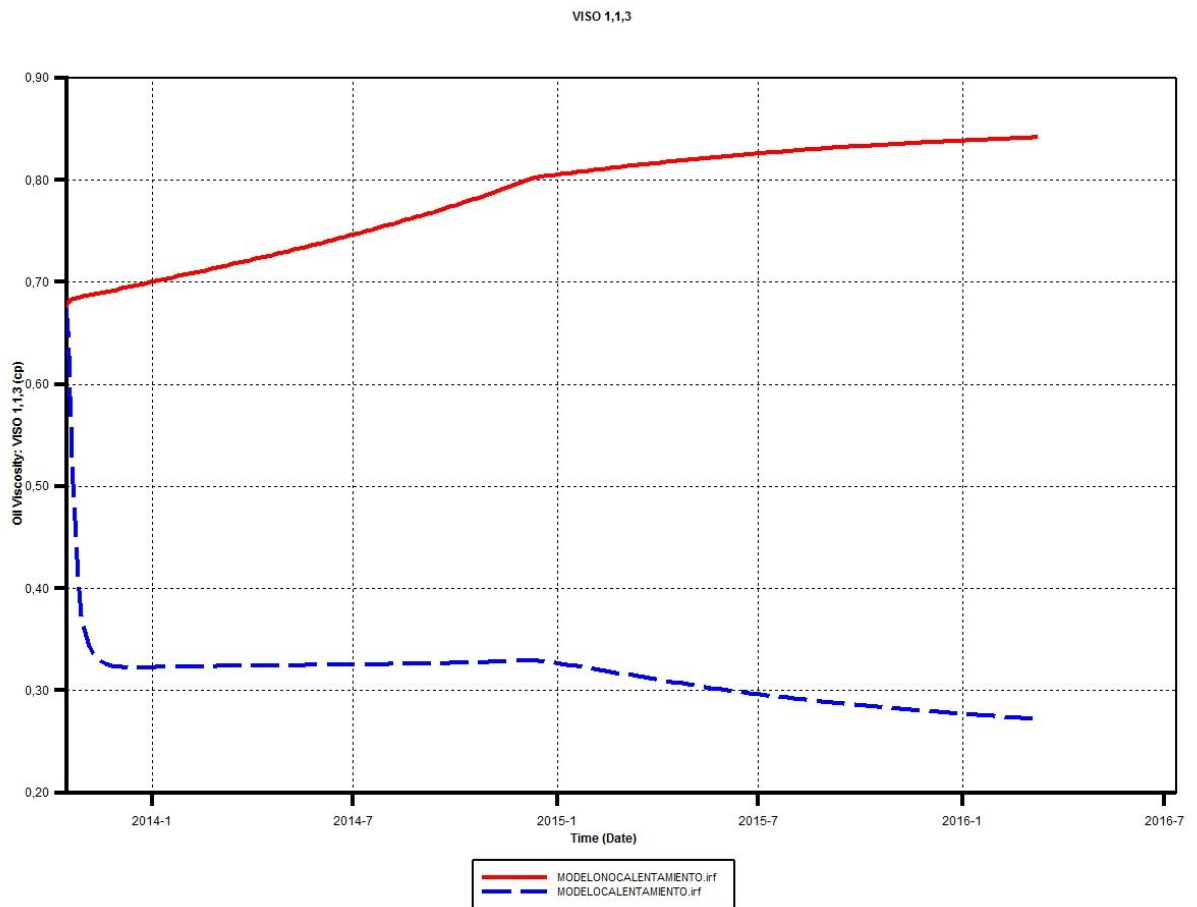


Fuente: Autores.

Como se mencionó, el incremento en la producción a lo largo de la simulación es mínima, ya que la movilidad del crudo aumenta muy poco. Obteniendo valores para el **Modelo CE** de 18510 BIs y para el **Modelo NO CE** de 18490 BIs. Con esto deducimos que el modelo produce 20 BIs incrementales de petróleo. Esta comparación a observamos en la **Figura 41**.

Comparando la viscosidad entre los dos modelos:

**Figura 41. Comparación de viscosidad del crudo.**



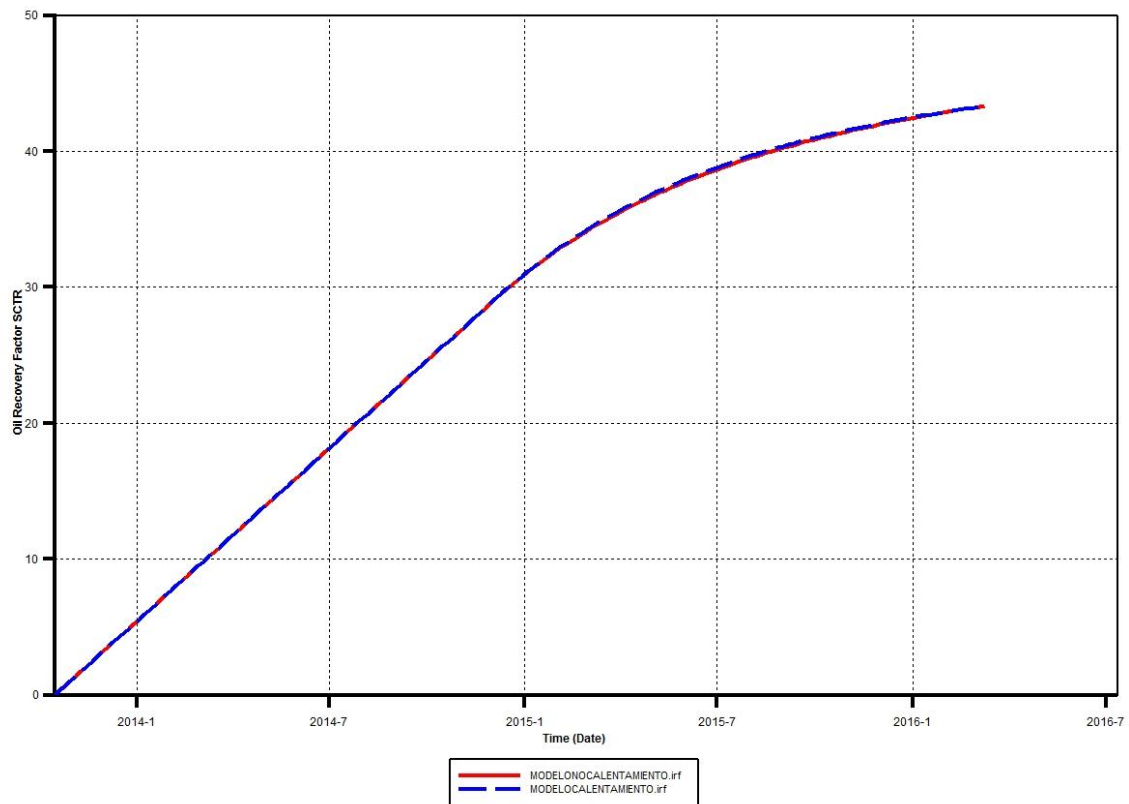
Fuente: Autores

El en **Modelo NO CE** se produce un leve aumento en la viscosidad debido a la mínima pérdida de calor que este posee, llegando a un valor de viscosidad de 0.85

cp. Por en cambio, como ya se había revisado, el **Modelo CE** alcanza a disminuir la viscosidad hasta 0.27 cp. Este valor sería más significativo en un modelo con un fluido mucho más viscoso, para que la temperatura produjera un mayor efecto sobre la viscosidad del fluido.

Revisando también el Factor de Recobro en la **Figura 42**, se observa que el incremento es mínimo, casi nulo, ya que los barriles incrementales son muy pocos. Ambos modelos alcanzan el 43.5 % en factor de recobro.

**Figura 42. Factor de recobro.**



Fuente: Autores.

### 4.3.1 Duty de Calor

El Duty de calor del proceso es el calor que se necesita agregar o remover de los fluidos del proceso para crear el cambio de temperatura requerido. Este calor puede ser en forma de calor sensible, calor latente o los dos<sup>53</sup>.

En este caso, se aplica el concepto de calor sensible, ya que el fluido absorbe la energía y produce un cambio de temperatura sin cambiar de fase.

Para calcular el duty, utilizaremos la temperatura máxima alcanzada en el bloque más cercano al electrodo, y también se calculara la cantidad de energía eléctrica (kW-h) para realizar la respectiva equivalencia para el cálculo del Duty.

Recordando la fórmula:

$$q_{sh} = W(C)(T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 30}$$

Dónde:

Qsh = Duty de calor sensible, BTU/hr

C= Calor específico del fluido, BTU/lb-°F

W= tasa de flujo másico, lb/hr

T1= Temperatura inicial, °F

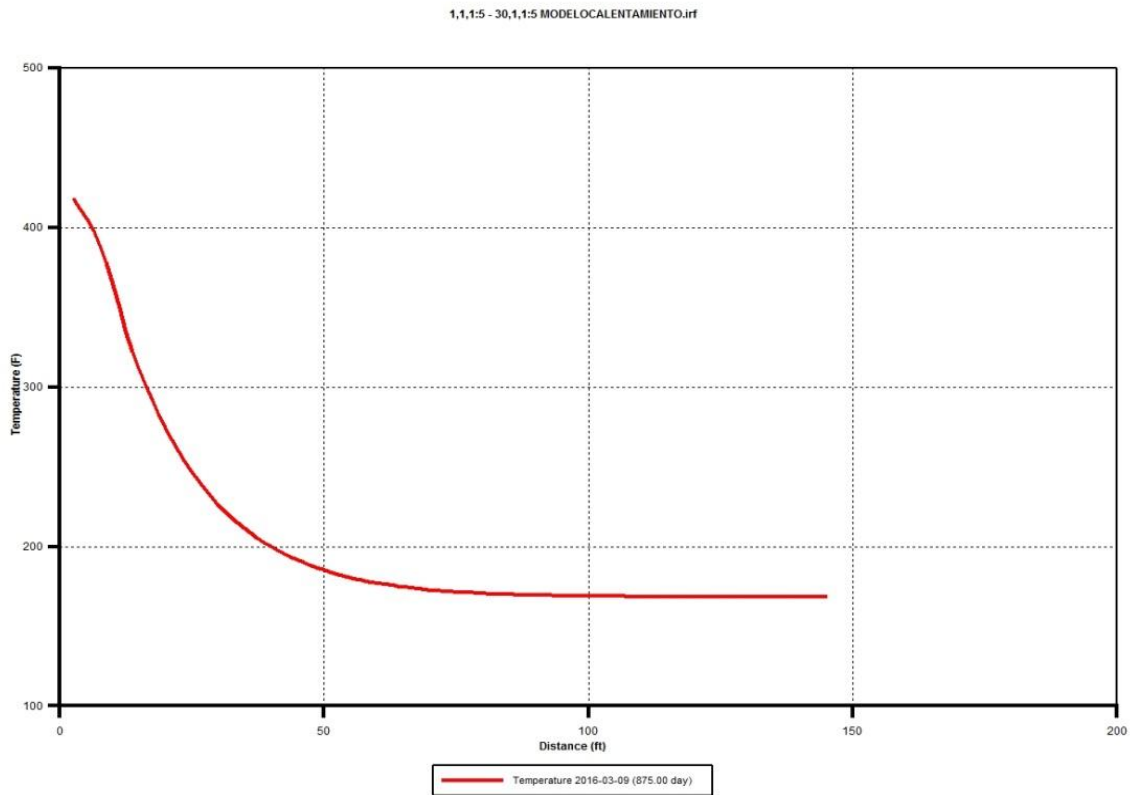
T2= Temperatura final, °F

Se halla las temperaturas de la siguiente gráfica.

---

<sup>53</sup> SANTOS, Nicolás. Transferencia e intercambiador de Calor. Especialización en Ingeniería de Gas, Cap. 1.

**Figura 43. Temperatura bloque más cercano electrodo.**

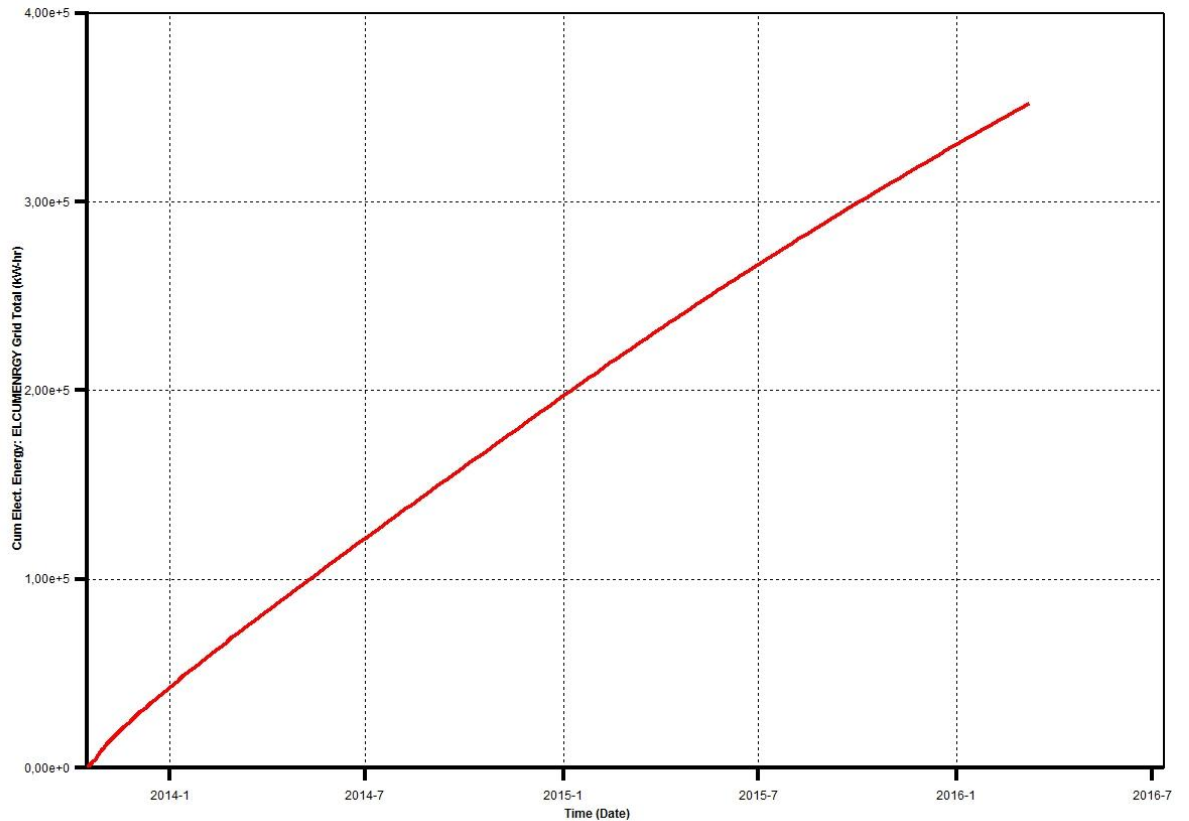


Fuente: Autores

De la **Figura 43**, se extraen los datos de  $T_1 = 174^\circ\text{F}$  y  $T_2 = 425^\circ\text{F}$ . El valor de Calor específico del fluido es conocido, en capítulo anterior, para el crudo de  $0.5 \text{ BTU/lb}^\circ\text{F}$ .

La equivalencia en energía, ya se mencionó en capítulos anteriores, respecto a la energía eléctrica aplicada al yacimiento.

**Figura 44. Energía eléctrica total**



Fuente: Autores

La energía eléctrica total aplicada al yacimiento mostrada en la **Figura 44**, es de 352575 KW-h. Pero esa es la energía acumulada, el cálculo se realizara con la energía eléctrica aplica o suministrada al sistema, en este caso, 70 kW. Haciendo la equivalencia con inyección de vapor, donde 100 kW-h equivale a 3m<sup>3</sup>/d de vapor, el valor del flujo másico será de 43.75 lb/h.

Con esto, el cálculo del Duty será:

$$q_{sh} = (43,75) * (0.5) * (425 - 174) \quad \text{Ecuación 31}$$
$$q_{sh} = 5490.75 \text{ BTU/hr}$$

Este dato será el calor necesario para elevar la temperatura del yacimiento, el Duty del sistema.

#### 4.3.2 Costo de la Energía

Según el reporte de CODENSA para el año 2013 de los costos de la energía para el sector industrial, el costo de la energía eléctrica es de 267,33 \$/kW-h. Y con una energía total inyectada de 352575 kW-h, el costo total de la energía será:

$$\text{Costo} = (267.33) * (352575) \quad \text{Ecuación 32}$$

$$\text{Costo} = 94'253.874,75 \$$$

#### 4.3.3 Movilidad

La movilidad del fluido se define como la permeabilidad efectiva de la roca a un fluido dividida por la viscosidad del fluido. De esta manera compararemos la movilidad del fluido antes y después del calentamiento, en el bloque más cercano al pozo.

**Modelo NO CE:**  $k_{ro} = 0,9$     $\mu = 0.69$  cp

$$\lambda_o = \frac{K_o}{\mu_o} = \frac{0.9}{0.69} = 1.3 \quad \text{Ecuación 33}$$

**Modelo CE:**  $k_{ro} = 0,9$     $\mu = 0.27$  cp

$$\lambda_o = \frac{K_o}{\mu_o} = \frac{0.9}{0.27} = 3.3 \quad \text{Ecuación 34}$$

Como se demuestra, la movilidad del crudo aumenta, pero no es significativa debido al valor tan bajo en la viscosidad, el cual sería mucho más notorio en un crudo más viscoso.

## 5. EFECTO DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO SOBRE LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS EN LA ZONA CALENTADA

### 5.1 GENERALIDADES DE LAS PARAFINAS

Las parafinas constituyen la clase más simple de los compuestos orgánicos, caracterizados porque los átomos están unidos por enlaces sencillos, indicando con ellos que los cuatro enlaces del carbono están satisfechos<sup>54</sup>. Los cuatro primeros miembros de la serie de los alcanos son (metano, etano, propano y butano), del pentano (C5) al hexano (C6) son líquidos y de ahí en adelante semi-sólidos y sólidos.

A medida que va aumentando el número de átomos de carbono en la molécula, su peso molecular va aumentando, la densidad y el punto de ebullición. Las parafinas normales son cadenas de hidrocarburos saturados, formados principalmente por cadenas entre C<sub>16</sub> y C<sub>60+</sub> con temperaturas de fusión de 64°F a 211°F. Los depósitos de parafina están acompañados de resinas, material asfáltico, arena, escamas y en ocasiones agua.

Estos compuestos son de cristalina y tienden a cristalizar y precipitar del crudo por debajo de su punto de cristalización<sup>55</sup>. Estos depósitos de parafina no son solubles en muchos crudos y son inertes al ataque de ácidos, bases y agentes oxidantes, de ahí su nombre parafina que proviene del latín *parum + affinis*, que significa “*poca afinidad*”.

---

<sup>54</sup> CHAVARRÍA, Sandra; NIÑO, Angélica. “EVALUACIÓN DEL DAÑO A LA FORMACIÓN POR PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS Y ASFALTENOS EN EL CAMPO COLORADO”. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2010.

<sup>55</sup> ARIZA, Emiliano. “DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE CRISTALIZACIÓN DE LAS PARAFINAS EN EL CRUDO DE CAMPO COLORADO”. Trabajo de grado para optar por título de Magister. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Hidrocarburos. Bucaramanga, 2005.

## **5.2 PROPIEDADES DE LAS PARAFINAS**

Es de gran importancia para aquellos crudos parafínicos, el análisis físico-químico, debido al riesgo que se corre durante la producción, por tal motivo se hace necesario conocer algunas de las propiedades de este crudo, tales como: punto de cristalización, punto de fluidez, peso molecular, viscosidad, solubilidad, carácter coloidal, nucleación, floculación. Ya que teniendo conocimiento de estas propiedades es posible prevenir o remediar complicaciones futuras en la producción.

### **5.2.1 Punto de Cristalización**

El punto de cristalización es un valor característico de algunos derivados del petróleo que define la temperatura a la que el fluido forma el primer cristal de soluto a presión determinada. Cuando esta propiedad se determina a condiciones atmosféricas se conoce como punto de nube. Para un estudio de daño a la formación es importante tener en cuenta que la medición del punto de cristalización se debe realizar en crudos vivos, debido el punto nube del aceite vivo con presión por debajo del punto de burbuja, es usualmente menor que el punto nube del aceite muerto<sup>56</sup>.

### **5.2.2 Punto de fluidez**

Cuando un crudo con mucho contenido de parafinas es enfriado, las parafinas o ceras empezaran a precipitarse, cuando la temperatura está por debajo del punto nube, estas ceras que han precipitado pueden formar depósitos en la pared de la

---

<sup>56</sup> (3) CANDELO, Andrés; CARVAJAL, Benjamín. "ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE CONTROL DE PARAFINAS PARA APLICACIÓN EN EL CAMPO COLORADO". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2010.

tubería en forma de gel de cera-aceite (Venkatesan et al., 2002). En cuanto la temperatura comienza a descender más, más cera se depositará y el grosor del gel de cera se incrementará, provocando una solidificación gradual del crudo, provocando que este pierda su movilidad, hasta perderla completamente. La temperatura a la cual la muestra de aceite para de moverse es definida como punto de fluidez del crudo<sup>57</sup>.

### **5.2.3 Contenido de parafina**

El contenido de parafina se calcula como el porcentaje en peso de parafina dentro de una muestra de petróleo. El contenido de parafina es un valor empírico que depende de las condiciones bajo las cuales la misma es separada del material original.

## **5.3 PROBLEMAS DE PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS EN EL CAMPO COLORADO**

La acumulación de depósitos de parafinas en los yacimientos, en los pozos y en las líneas de producción ocasiona serios trastornos, además de incrementar gradualmente los costos de operación. El campo Escuela Colorado no es ajeno a este inconveniente, ya que este ha sido uno de sus principales problemas en su historia. Evidencia de este fenómeno se observa en los continuos taponamientos en las distintas líneas de producción, disminución de la productividad y hasta abandono de pozos. La declinación en la producción de los pozos del Campo

---

<sup>57</sup> GARCÍA, Christian; OLVERA, Oswaldo. "SISTEMAS Y DISPOSITIVOS ESPECIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS PESADOS" Universidad Nacional Autónoma de México. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. México D.F. Ciudad Universitaria, 2010.

Colorado es de un promedio del 15% anual y se debe principalmente a este problema<sup>58</sup>.

La precipitación es a menudo estudiada para crudos muertos y teniendo como principal factor los cambios de temperatura, pero el efecto de la presión y la composición del crudo no es muy clara. La solubilidad de la parafina disminuye con el incremento de presión en la solución, debido a que las fuerzas intermoleculares entre moléculas del mismo tipo son mayores que entre moléculas no similares, causando incremento en el punto de cristalización.

La acumulación de ceras parafínicas en la cara de la formación ocasiona un deterioro gradual en la permeabilidad y afecta directamente la producción de crudo. La disminución de la producción, depende básicamente de una reducción en la permeabilidad de la formación a los fluidos, o un incremento en la viscosidad del fluido. Al llevar los fluidos del yacimiento a fondo de pozo ocurre una caída de presión, la cual controla en gran medida la entrada de fluidos<sup>59</sup>.

Debido a la necesidad de prevenir o remediar estos daños causados por la precipitación de parafinas, en el campo Colorado se han realizado varios trabajos de investigación enfocados a determinar la efectividad de estos diferentes métodos. Se ha tratado de remediar mediante el método de inyección de aceite caliente en las líneas de superficie y baches de químicos por el anular del pozo. Sin embargo, basados en resultados de estudios realizados por el Instituto Colombiano del Petróleo en otros campo con características semejantes a campo Colorado, la inyección de fluidos caliente como aceite puede ser causante de la baja productividad de los pozos por generar precipitación y/o depositación de

---

<sup>58</sup> CHAVARRÍA, Sandra; NIÑO, Angélica. "EVALUACIÓN DEL DAÑO A LA FORMACIÓN POR PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS Y ASFALTENOS EN EL CAMPO COLORADO". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2010.

<sup>59</sup> CANDELO, Andrés; CARVAJAL, Benjamín. "ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE CONTROL DE PARAFINAS PARA APLICACIÓN EN EL CAMPO COLORADO". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2010.

parafinas en la cara del pozo, debido a que no tuvieron en cuenta las características propias del crudo inyectado.

## **5.4 FACTORES QUE AFECTAN LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS**

Muchas investigaciones han sido dirigidas para intentar entender y modelar el proceso en que las parafinas se depositan y que factores influyen para que este proceso ocurra, el cual es un problema muy complejo que involucra dinámica de fluidos, masa y transferencia de calor, además de termodinámica. Conocer que factores influyen en la precipitación de parafinas me permite seleccionar un adecuado método para su control que conllevará al éxito en la corrección del problema. Algunos de los factores que tiene mayor influencia en este fenómeno son los siguientes:

### **5.4.1 Temperatura**

La temperatura de los hidrocarburos a condiciones de yacimiento depende de la profundidad a la que se encuentren. A medida que están siendo producidos y viajan a superficie, estos se enfrían. Este enfriamiento provoca una pérdida de la solubilidad de la parafina (solute) dentro del solvente (crudo sin parafina) haciendo que se inicie la precipitación de las mismas.

Los cambios de temperatura en el yacimiento se pueden dar por<sup>60</sup>:

- Liberación del gas en el yacimiento, es decir disminución de la solubilidad.
- Radiación de calor del yacimiento a las formaciones vecinas.

---

<sup>60</sup> (1) CHAVARRÍA, Sandra; NIÑO, Angélica. "EVALUACIÓN DEL DAÑO A LA FORMACIÓN POR PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS Y ASFALTENOS EN EL CAMPO COLORADO". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2010.

- Liberación del gas y los compuestos livianos del crudo al momento de producirse.
- Cambio de temperatura por intrusión de agua.

#### **5.4.2 Presión**

La solubilidad de la parafina disminuye con el incremento de presión en la solución (parafina – crudo muerto), debido a que las fuerzas intermoleculares entre moléculas del mismo tipo son mayores que entre moléculas no similares, ocasionando un incremento en el punto de cristalización. Una manera de disminuir el punto de cristalización, es incrementando la presión en la tubería mediante el aumento de la presión de operación del separador.

#### **5.4.3 Peso Molecular y del Punto de fusión de la parafina**

A temperatura constante, cuando el peso molecular de la parafina se incrementa, el punto de fusión se aumenta, disminuyendo la solubilidad en los solventes. Es decir, que la concentración de parafina en el crudo influenciará sobre la temperatura del punto de fusión y por tanto sobre la temperatura del punto de cristalización.

De otro lado, la precipitación de parafinas depende de la composición del crudo parafínico, ya que cuando el peso molecular aparente de la solución disminuye, la temperatura del punto de cristalización disminuye, lo cual provocaría un retraso en la precipitación de parafinas.

#### **5.4.4 Naturaleza de la solución**

Al hablar de la naturaleza de la solución se hace referencia a la composición física y química de la misma, en este caso el crudo. Es uno de los parámetros más

importante, debido a que permite identificar la distribución de la molécula de carbono. La composición física indica la presencia y cantidad de materiales como: agua, resinas, metales, productos de corrosión, material asfáltico coloidal, arena y arcilla que actúan como centros de nucleación de las parafinas. De acuerdo a experimento se puede decir, que si la composición físico-química de la solución tiende a ser más liviana, disminuye el punto de cristalización, favoreciendo por tanto el flujo de los hidrocarburos.

## **5.5 UMBRAL DE PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS DEL CAMPO COLORADO**

La precipitación de parafinas es un problema que se presenta en muchos campos productores de hidrocarburos ocasionando problemas operacionales e incrementos en costos, que pueden conllevar en casos severos a la pérdida del pozo. Con el fin de evitar esta clase de problemas es necesario caracterizar correctamente los fluidos del yacimiento, conocer su comportamiento termodinámico y composicional, con el objetivo de evaluar las posibles condiciones en las que se pueda presentar el fenómeno de depositación.

Para llevar a cabo este propósito, se debe contar con una muestra representativa del fluido, con la cual se pueda realizar un estudio adecuado y experimentalmente identificar que métodos de prevención y control se pueden implementar para contribuir en la solución del problema.

Por tal motivo se hace necesario la elaboración de una envolvente de depositación de parafinas, la cual es una serie de puntos de cristalización en las que se demarcan las zonas en donde se puede presentar o no precipitación. Esta envolvente se puede obtener mediante métodos experimentales a partir de una muestra tomada en fondo que sea representativa del yacimiento. Esta muestra no siempre es fácil de tomar, porque se requiere hacer la selección y adecuación de

un pozo siguiendo las normas estándares, causando pérdidas en producción mientras se hace la operación, lo que muchas compañías productoras no están dispuestas a asumir.

La envolvente de precipitación se construye a partir de la unión de puntos de cristalización tomados a diferentes presiones desde yacimiento hasta condiciones atmosféricas. En un diagrama P-T se grafica la envolvente o umbral de cristalización, que delimita los estados termodinámicos de precipitación; la región a la izquierda a partir de la envolvente es en donde sucede la precipitación. Arriba de la línea de saturación la pendiente puede ser negativa cuando se tienen hidrocarburos muy livianos que al ser presionados dentro del aceite se causa una disminución en la temperatura de cristalización; al contrario si los hidrocarburos son intermedios con la presión se incrementa esta temperatura. La forma de la parte baja de la envolvente es principalmente una función de la composición de los hidrocarburos intermedios y livianos del fluido de yacimiento<sup>61</sup>.

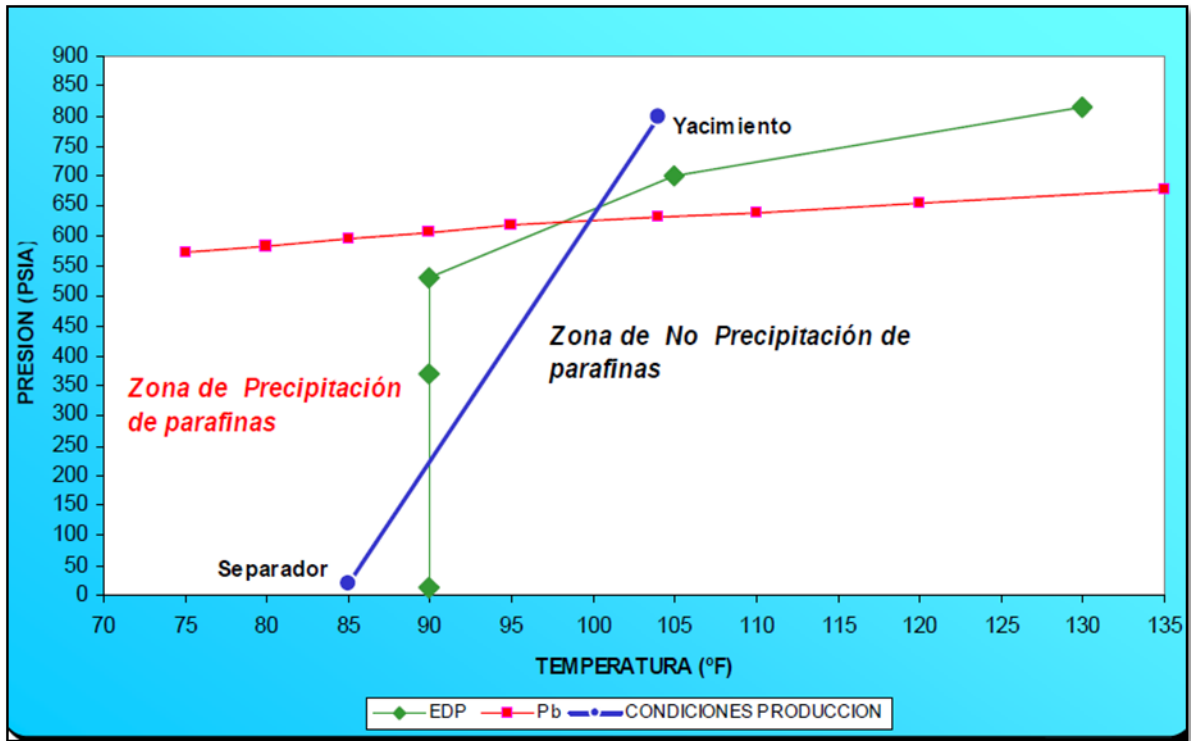
A partir de los resultados descritos en las mediciones elaboradas a una muestra de fondo de los fluidos del yacimiento tomada en el pozo Colorado 25, los cuales fueron detallados en el trabajo de investigación del ingeniero Emiliano Ariza, se elaboró una envolvente de precipitación de parafinas para el campo Colorado en las arenas B de la Formación Mugrosa.

Los puntos de cristalización fueron medidos en laboratorio mediante la técnica NIR a condiciones de presión y temperatura encontradas en el pozo. En la **figura 45**, se muestra el espacio termodinámico y físico en que se puede presentar la precipitación de parafinas.

---

<sup>61</sup> ARIZA, Emiliano. "DE LA CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS QUÉ ES CLAVE PARA DIAGNOSTICAR LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS". Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol. 9 N° 1 de 2011 - Ene/Jun - pp 33/39

**Figura 45. Condiciones de precipitación parafinas**



**FUENTE:** ARIZA, Emiliano. "DE LA CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS QUÉ ES CLAVE PARA DIAGNOSTICAR LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS". Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol. 9 Nº 1 de 2011 - Ene/Jun - pp 33/39

## 5.6 EFECTO DEL CAMBIO DE TEMPERATURA DEBIDO AL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO SOBRE LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS EN LA ZONA CALENTADA

La viabilidad de un proyecto de Calentamiento Eléctrico Resistivo, así como también la de cualquier otro proyecto de estimulación, van a depender de un gran número de factores que van desde las mismas características del yacimiento hasta la factibilidad económica en la implementación del método. Uno de los factores importantes para determinar si el calentamiento eléctrico resistivo es

viable, es si la estimulación implementada genera un cambio o una respuesta en el comportamiento del yacimiento.

La conducción de la corriente eléctrica a través del medio poroso es representada a partir de una diferencia de potencial. Cuando la zona que se desea calentar es sometida a una diferencia de potencial esta genera un campo eléctrico que recorre el sistema. Este campo eléctrico hace que los iones en el agua intersticial aceleren en dirección paralela a las líneas del campo, una vez los iones encargados de transportar la carga eléctrica en el sistema son acelerados por el campo eléctrico, se produce una transferencia de energía que posteriormente genera calor debido a la energía disipada cuando se presentan una serie de choques entre los iones acelerados y las demás partículas presentes en el agua, conocido este fenómeno como Efecto Joule.

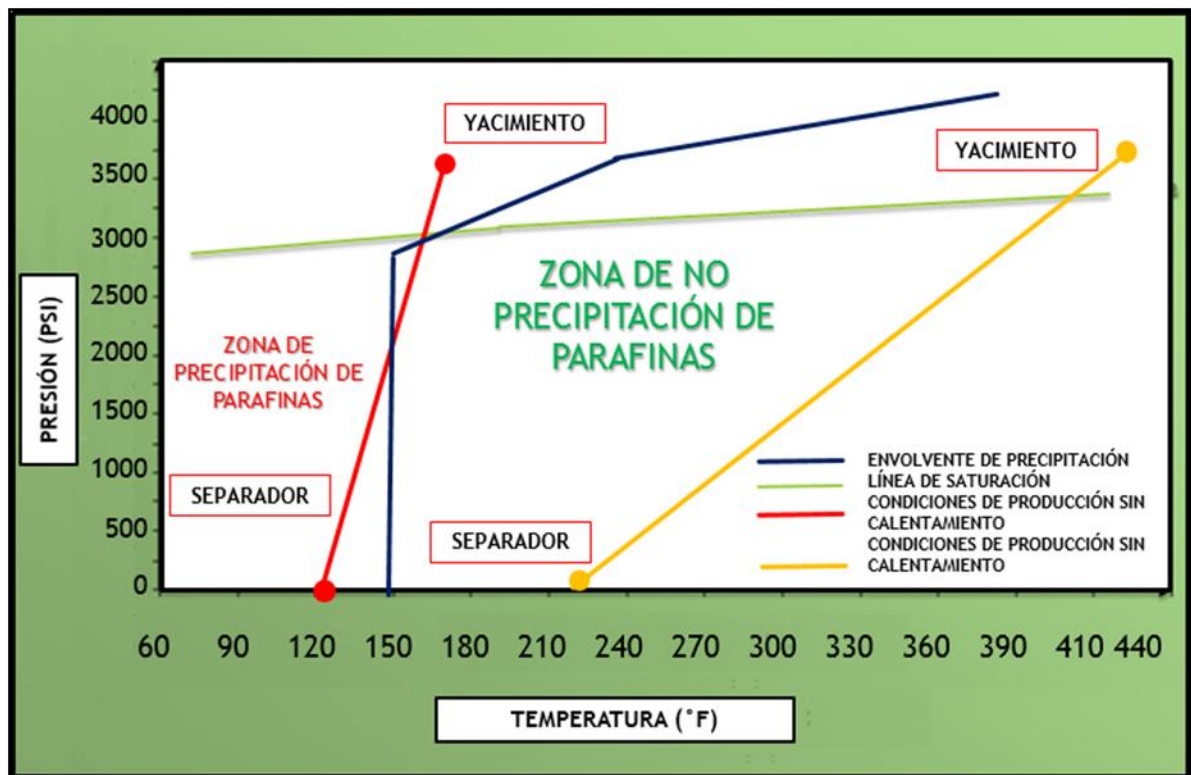
A medida que una mayor cantidad de energía es conducida al yacimiento, el aumento de temperatura en la zona cercana al electrodo es mayor, produciendo que el efecto del calentamiento sobre la viscosidad de los fluidos presentes en la zona sea más significativo.

Tal como se mostró en el capítulo anterior el objetivo de este trabajo es realizar un análisis de los efectos sobre el comportamiento de un pozo del campo Colorado sometido a un proceso de Calentamiento eléctrico Resistivo. Estos análisis fueron realizados mediante un estudio de simulación, en el módulo de calentamiento eléctrico del simulador de procesos térmicos STARS.

En la **Figura 46**, se muestran las condiciones de producción de la zona sometida a calentamiento eléctrico, pudiéndose apreciar el aumento significativo de la temperatura a través del radio de calentamiento. Estos cambios de temperatura además de generar un efecto positivo en la movilidad del fluido, garantizan que la temperatura del mismo va a mantenerse a una temperatura mayor a la que se

encontraba antes del calentamiento. Sin embargo, no es posible estimar de una forma exacta si se encontrará fuera del umbral de precipitación de parafinas, debido a que no se cuenta con una envolvente de depositación de parafinas producidos en la zona C del campo. (La única envolvente de precipitación es la del pozo Colorado 25, en la zona B de la Formación Mugrosa, la cual no es representativa del fluido con el que se elaboró el modelo del yacimiento). Por tanto se realizó una envolvente de precipitación aproximada a través de la envolvente de depositación de la zona B.

**Figura 46. Envloente de depositación de parafinas modelo calentado**



FUENTE: Autores

## 6. CONCLUSIONES

- La cantidad de energía aplicada al yacimiento es el principal factor que interviene en el proceso de transferencia de energía. Y esta depende del voltaje y la corriente aplicada, ya que la potencia o el "power" determina la cantidad de energía inducida; la corriente determina la frecuencia del calentamiento, y el voltaje determina cuanta de esa energía es transmitida.
- En el comportamiento del perfil de temperatura influyen 2 factores importantes, la energía eléctrica aplicada y la saturación de agua del yacimiento. Ya que si esta energía es muy alta, un aumento de temperatura muy abrupto se producirá, posibilitando que se produzca evaporación del agua del yacimiento y por ende no permita la conductividad y transferencia de energía.
- En el proceso de calentamiento eléctrico resistivo el aumento de temperatura se produce de manera instantánea y la transferencia del mismo depende de la conductividad del agua del yacimiento.
- Con grandes cantidades de energía eléctrica aplicada se producen puntos calientes, debido a la evaporación del agua intersticial, donde la transmisibilidad es muy poca y se "gasta" mucha energía en un mismo punto o zona.
- Como se observa en el perfil de temperatura, el proceso de calentamiento eléctrico resistivo es efectivo máximo hasta los primeros 40 a 50 ft, que es donde más tiene alteración y cambios en la temperatura.

- El aumento en la producción fue muy poco, debido a que la viscosidad inicial del campo era muy baja, razón por la cual, viendo el proyecto desde un punto inversor, no sería viable. Pero comparando los porcentajes presentados en la disminución de la viscosidad con otras pruebas de campo de la bibliografía, los resultados son satisfactorios.
- La movilidad del crudo aumenta con el proceso de calentamiento eléctrico resistivo, gracias a la disminución de la viscosidad, pero su efecto en la producción es mínimo debido a la baja viscosidad inicial del crudo.
- La temperatura es uno de los principales factores que influyen en la precipitación y depositación de parafinas, debido a que el sistema es más sensible a los cambios de esta. Por medio del Calentamiento Eléctrico Resistivo es posible mantener una temperatura que no permita la depositación de las parafinas estabilizándolas por encima de su umbral de depositación.
- La simulación numérica de yacimientos es una herramienta útil como mecanismo de pruebas, permitiendo a través de este, la consecución de un consistente modelo característico de comportamiento del Campo Colorado. Sin embargo, la falta de información más detallada y concreta es causante de una cierta desviación e incertidumbre en los resultados.
- Al no contar con un estudio de fluidos detallado para cada pozo productor del Campo Colorado no es posible determinar la correspondiente envolvente de depositación de parafinas, por tanto, no se puede comparar de forma directa los efectos del calentamiento eléctrico resistivo sobre un pozo.

## 7. RECOMENDACIONES

- Los resultados de la simulación están limitados en exactitud, ya que debió haberse incluido formaciones adyacentes al yacimiento que alteraran y/o excitaran los cambios de potencial en la roca y la transmisibilidad de la energía.
- Se recomienda hacer un estudio del efecto del Calentamiento Eléctrico Resistivo en un campo pesado, donde sea posible observar de una mejor manera los efectos de la temperatura sobre la reducción de la viscosidad.
- Se requiere contar mayor información de las propiedades de los fluidos en el Campo Colorado con el fin de obtener un modelo del yacimiento más confiable y acorde al comportamiento real del yacimiento.
- El perfil de temperatura construido se basa en un modelo simple de calentamiento eléctrico resistivo, sin tener en cuenta especificaciones en el completamiento del pozo, ni características de elementos propios del calentamiento eléctrico.
- El proceso Calentamiento Eléctrico Resistivo no debe ser considerado como un método de recobro económicamente rentable debido al poco aumento observado en la producción. Para este caso se aplicaría como un método de estimulación para la prevención y remediación de la precipitación de parafinas.

## BIBLIOGRAFÍA

- AKSHAY Sahni and MRIDUL Kumar “ELECTROMAGNETIC HEATING METHODS FOR HEAVY OIL RESERVOIRS”. Chevron Petroleum Technology Company. SPE 62550. California, 2000.
- ALBINA Mukhametshina and ELENA Martynova. “ELECTROMAGNETIC HEATING OF HEAVY OIL AND BITUMEN: A REVIEW OF EXPERIMENTAL STUDIES AND FIELD APPLICATIONS”. Harold Vance Department of Petroleum Engineering, Texas A&M University, 3116 TAMU-407 Richardson Building, College Station, TX, USA. Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 65 Leninsky Prospekt, Moscow, Russia. Accepted 11 March 2013. Academic Editor: Jorge Ancheyta.
- AMIT CHAKMA, U. of Calgary, and K.N. Jha, CANMET “HEAVY-OIL RECOVERY FROM THIN PAY ZONES BY ELECTROMAGNETIC HEATING”. SPE 24817. Washington DC, 1992.
- ARIZA, Emiliano. “DE LA CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS QUÉ ES CLAVE PARA DIAGNOSTICAR LA PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS”. Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol. 9 N° 1 de 2011 - Ene/Jun - pp 33/39
- ARIZA, Emiliano. “DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE CRISTALIZACIÓN DE LAS PARAFINAS EN EL CRUDO DE CAMPO COLORADO”. Trabajo de grado para optar por título de Magister. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Hidrocarburos. Bucaramanga, 2005.

- ARIZA, Emiliano. “DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE CRISTALIZACIÓN DE LAS PARAFINAS EN EL CRUDO DE CAMPO COLORADO”. Trabajo de grado para optar por título de Magister. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Hidrocarburos. Bucaramanga, 2005.
- ARIZA. E. 2011. “Caracterización de crudo que es clave para diagnosticar la precipitación de parafinas”. Artículo Revista Fuentes: El Reventon Energético. Vol 9 No1 de 2011.
- ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. “Surface Production Operations: Design of Gas-Handline Systems and Facilities”. Publicado por Gulf Publishing Company, Houston, Texas. 1999.
- B.A.BAYLOR, J.B. MAGGARD, y R,A WATTENBARG, 1990. “Improved Calculation of Oil Production Response to Electrical Resistance Heating (ERH)”. SPE 20482. Texas, USA.
- BAYLOR B.A., MAGGARD J.B. and WATTENBARGER R.A., 1990. “Improved Calculation of Oil Production Response to Electrical Resistance Heating (ERH). Texas A&M U. SPE 20482.
- Bruce C. W. McGee and Fred E. Vermeulen. “POWER LOSSES IN STEEL PIPE DELIVERING VERY LARGE CURRENTS”. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. XX, NO. Y, MMM YYYY.
- ÇAĞDAŞ, ACAR. “ENHANCING PETROLEUM RECOVERY FROM HEAVY OIL FIELDS BY MICROWAVE HEATING”. Degree of Master of Science In Petroleum and natural gas engineering. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY. 2007.

- CANDELO, Andrés; CARVAJAL, Benjamín. “ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE CONTROL DE PARAFINAS PARA APLICACIÓN EN EL CAMPO COLORADO”. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2010.
- CARRIZALES M.A. 2010 “Recovery of Stranded Heavy Oil by Electromagnetic Heating” University of Texas at Austin. Tesis válida para PhD.
- CASTELLANOS, Henry; GRAJALES, Fernando. “MODELO ANALÍTICO DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO APLICADO A LA FORMACIÓN EN YACIMIENTOS DE ACEITE PESADO”. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2004.
- CHAVARRÍA, Sandra; NIÑO, Angélica. “EVALUACIÓN DEL DAÑO A LA FORMACIÓN POR PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS Y ASFALTENOS EN EL CAMPO COLORADO”. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2010.
- CIVAN F. Reservoir Formation Damage 2da edición.
- CODENSA.[http://www.codensa.com.co/documentos/2\\_22\\_2013\\_11\\_34\\_06\\_AM\\_Tarifario\\_Febrero.pdf](http://www.codensa.com.co/documentos/2_22_2013_11_34_06_AM_Tarifario_Febrero.pdf). Reporte Febrero para el año 2013
- Coeficiente de Expansión Térmica.  
<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>.  
Propiedades de las rocas.

- Computer Modeling Group Ltd. CMG, “ADVANCED PROCESS AND THERMAL RESERVOIR SIMULATOR, USER’S GUIDE STARS”. 2009.
- DELGADO, Ronald; RODRIGRUEZ, Carlos. “INSPECCIÓN VISUAL A LAS INSTALACIONES DEL CAMPO ESCUELA COLORADO”. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Bucaramanga, 2012.
- GARCÍA, Christian; OLVERA, Oswaldo. “SISTEMAS Y DISPOSITIVOS ESPECIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS PESADOS” Universidad Nacional Autónoma de México. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. México D.F. Ciudad Universitaria, 2010.
- GARCÍA, Jerson; FONSECA, Crespín. “MODELO SEDIMENTOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO DE LA FORMACIÓN MUGROSA EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO”. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga, 2009.
- HOLMAN J.P. 2010 “Heat Transfer” 10ma edición. McGraw Hill.
- LEONTARITIS K.J. 1996 “Asphaltene Near - Wellbore Formation Damage Modeling,” SPE Paper 39446
- LIU, M.Y. y ZHAO, G. “Parametric Study of Heavy Oil Recovery by Electromagnetic Heating”. University of Regina. Faculty of Engineering and Applied Science, Regina, SK, Canada, 2000.
- MANSOORI G.A.1997 “Modeling of Asphaltene and Other Heavy Organic depositions”

- McGEE, B. C. W, 2007. "The Mechanisms of Electrical Heating For the Recovery of Bitumen From Oil Sand". Universidad de Alberta. Petroleum Society of Canada.
- McGEE, B.C.W, 2004. "Electrical Heating". McMillan-McGee Canada Company. JCPT 94-04-04. Universidad de Alberta.
- MERCADO, Diana; RICARDO, Jesus. "ESTUDIO DE SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEM ROCA-FLUIDO DE UN YACIMIENTO DE CRUDO PESADO AL SER SOMETIDO A CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2005.
- MONROY, Manuel; FIGUEROA, Diego. "DISEÑO DEL COMPLETAMIENTO DE UN POZO QUE SE SOMETERA A ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMÁGNETICO". Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2005.
- NARAYAN S. and DUSSEULT M.B, 1995 "Electrical Resistance Tomography of Monitoring Shallow Enhanced Recovery Processes". University of Waterloo. SPE 30259.
- PIZARRO J.O.S, and TREVISAN O.V. 1989 "Electrical Heating of Oil Reservoirs: Numerical Simulation and Field Test Results.
- RAMIREZ, Wilman. "CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y MINERALÓGICA PRELIMINAR DE FACIES ARENOSAS Y LODOSAS DE

LA FORMACIÓN MUGROSA EN EL SECTOR DEL CAMPO ESCUELA COLORADO, CUENCA DEL VALE MEDIO DEL MAGDALENA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA”. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga, 2009.

- SALAS, Alfredo. “ESTUDIO EXPERIMENTAL DE RECUPERACIÓN MEJORADA POR EFECTO JOULE EN UN YACIMIENTO FRACTURADO”. Tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de México. México DF, 2012.
- SANTOS, Nicolás. “Transferencia e intercambiador de Calor”. Especialización en Ingeniería de Gas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2013.
- SWAPAN DAS, 2008, “Electro-Magnetic Heating in Viscous Oil Reservoir” Marathon Oil Corporation. SPE/PS/CHOA 117693.
- Swapan Das, SPE, Marathon Oil Company, “ELECTRO-MAGNETIC HEATING IN VISCOUS OIL RESERVOIR”. SPE/PS/CHOA 117693 PS200-330. 2008.
- URIBE HIDALGO, Carlos Andres “EVALUACION TECNICO-FINANCIERA DE UN PROCESO DE INYECCION CICLICA DE VAPOR USANDO POZOS HORIZONTALES”. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2012.
- V. Peraser, S.L. Patil, S. Khataniar, A.Y. Dandekar, V.S. Sonwalkar, The University of Alaska Fairbanks. “EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC

HEATING FOR HEAVY OIL RECOVERY FROM ALASKAN RESERVOIRS". SPE paper 154123. 2012.

- VILLAREAL, Erika; MOYA, Helda. "ANALISIS DE FLUIDOS APLICADO A LOS HIDROCARBUROS EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO". Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2012.

## ANEXO

### SECCIONES DEL MODULO STARS DEL SIMULADOR CMG

- **Módulo I/O Control (Entrada y salida de datos):** Se definen parámetros de entrada y salida del simulador, se tienen secciones en las cuales se puede agregar o modificar títulos de los casos estudiados, el dimensionamiento del tiempo de la corrida, archivos Restart, resultados y texto de la corrida.
- **Módulo Reservoir (Descripción del yacimiento):** Se puede crear o importar el mallado de simulación, así como una serie de propiedades de las cuales algunas son opcionales y otras necesarias para crear el modelo; Permeabilidad, porosidad, saturación de los fluidos, presiones, regiones del mallado, espesores. Creación y edición del acuífero.
- **Módulo Components (Propiedades de los fluidos):** Se cargan las propiedades de los fluidos que se encuentran presentes en el yacimiento (o, w, g) como entalpía, factor volumétrico, variación de la viscosidad respecto a la temperatura, peso molecular y propiedades críticas. Se pueden importar a partir de un PVT.
- **Módulo Rock-Fluid (Propiedades de la roca):** Para especificar las permeabilidades relativas y presiones capilares para los diferentes tipos de roca que se tengan en el yacimiento. Sección para el modelaje de histéresis.
- **Módulo Initial Conditions (Condiciones iniciales):** Permite introducir la información referente al yacimiento en sus condiciones iniciales.

Información adicional puede ser introducida en esta sección que incluyen métodos de cálculos de equilibrio vertical, saturaciones iniciales del yacimiento, presión de referencia, profundidad o bloque de referencia. Se pueden asignar diferentes regiones al yacimiento.

- **Módulo Numerical (Condiciones numéricas):** Se definen los parámetros que controlan las operaciones numéricas del simulador, tales como los intervalos de tiempo, la solución iterativa de ecuaciones de flujo no lineal y solución de ecuaciones lineales.
- **Módulo Geomechanics (Geomecánica):** Es un módulo opcional el cual solo puede ser usado por STARS, en el que se pueden ingresar parámetros geomecánicos del modelo creado; operaciones de cálculo, tipos de roca geomecánicos y condiciones numéricas.
- **Módulo Well & Recurrent (Datos recurrentes del pozo):** Define cada uno de los eventos establecidos dentro del programa de simulación. Un evento es una especificación de carácter operativo que depende del tiempo, por ejemplo, la producción o cierre de un pozo.

Una sección extra implícita en el simulador es Result Graph (Resultados Graficos), una herramienta post-procesador que permite visualizar, a través de graficas 2D, los diferentes resultados de producción y otros parámetros como la presión, de forma que a través de ellos se obtengan instrucciones.

También existe Results 3D (Resultados en 3D), es un post-procesador el cual permite visualizar en 2D y 3D el mallado del modelo, así como la variación de distintos parámetros con el tiempo.