

**Metodología para la simulación de un proceso de calentamiento electromagnético en la  
recuperación de crudos pesados usando un simulador de yacimientos comercial  
(CMG-STARS)**

**Lizeth Daniela Pardo Heredia y Gustavo Rozo Páez**

**Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos**

**Director**

**Andrés Felipe Ortiz Meneses**

**M.Sc. en Ingeniería de Hidrocarburos**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela de Ingeniería de Petróleos**

**Ingeniería de Petróleos**

**Bucaramanga**

**2023**

### **Dedicatoria**

Primero, a DIOS, por permitirnos cumplir un objetivo más en nuestra vida, él es el causante de que todos nuestros sueños se hagan realidad.

A la UIS, por ser la institución de la que nos sentimos orgullosos pertenecer y de la cual tenemos un pedazo impregnado en nuestro corazón.

A nuestro director de tesis, Profe Andrés, que siempre nos demostró que, con ese sentimiento de amistad, paciencia y perseverancia, todo se puede, nunca vamos a dejar de estar agradecidos.

Al Grupo de Investigación en Tomografía Computarizada (GIT), por permitirnos estar junto a ustedes y ser parte de esto, desde la creación del mismo grupo.

Familia, amigos, profesores, compañeros y ACEIP.

### **Agradecimientos**

A Dios por guiarme, acompañarme y bendecirme en esta etapa de mi vida, por permitirme vivir esta experiencia que me ayudo a crecer personal y profesionalmente, superando los obstáculos que se me presentaron en el camino

A mis padres Ana Hilda y Armando quienes me apoyaron en esta etapa y en especial a mi mamá por su amor y ejemplo que forjaron en mi parte de ser quien soy actualmente.

A mi hermana Andrea que a través de sus vivencias me aconseja y me cuida desde que éramos muy pequeñas, gracias por ser tan incondicional y espero sea así por el resto de nuestras vidas.

A mi compañero de Tesis por ser mi mejor amigo, cómplice y socio con quien he vivido muchas experiencias de vida, gracias por ser mi apoyo incondicional en cada paso que doy y espero compartir mi vida contigo para lograr retribuirte todo lo que has hecho por mí.

A nuestro director de Tesis MSC. Andrés Felipe Ortiz por su paciencia, dedicación y apoyo durante esta etapa, quien fue fundamental para culminarla, le agradezco de todo corazón por ser una excelente persona.

A mis amigos que conocimos en la u, de quienes aprendí mucho y que siempre estarán en mi corazón; Massa, Tatiana, Camilo, Nidya, Lina, Mapu, Magdalena, Julián, Nicolás y Ricardo.

*Lizeth Daniela Pardo*

### **Agradecimientos**

A Dios, mi más importante guía, por brindarme tantas oportunidades buenas y bendiciones en la vida, con Él siempre viviré agradecido.

A mis padres Gustavo y Elcy, que son mi motor de vida, desde pequeño solamente se han preocupado por brindarme siempre lo mejor y nunca se cansan de hacerlo, ustedes me criaron con valores y no saben lo mucho que lo aprecio en mi vida. Mil y mil gracias por todas sus bendiciones y enseñanzas. Los Amo, y nunca dejaré de estar agradecido con ustedes.

A mi hermana Leydi, que siempre me ha demostrado todo su amor y cariño, no importa el qué ni el cómo, siempre estas ahí apoyándome, eres una gran mujer. Te amo y te admiro profundamente. A Krys por darme la oportunidad de quererte como un hermano, a pesar de la distancia, ¡te quiero Mano! Y a mis dos sobrinos porque, a pesar de su corta edad, solo evocan ternura y amor, los amo, ¡siempre voy a ser su tío favorito! y ustedes mis sobrinos favoritos!

Y cómo resumir el agradecimiento a mi compañera de tesis, comenzando porque fue mi compañerita desde que iniciamos la carrera, mi mejor amiga incondicional y siempre con los mejores consejos oportunos, mi pareja, mi compañera de chisme, aventuras, viajes y vida, y para completar mi socia en nuestro proyecto personal-familiar: Bomboloni. A ti más que gratitud te tengo amor, admiración y respeto, por siempre.

Al profe Andrés que, no he conocido persona más incondicional y comprometido con nuestra investigación que usted, siempre le tendré mi infinito agradecimiento y admiración.

A los amigos y compañeros que me dejo la universidad, que, a pesar de perder contacto con algunos, fueron personas muy importantes en este camino: Massa, Camilo, Tatiana, Nidya, Lina, Magdalena, Julián. Y mención especial para los chicos de ACEIP. ¡Gracias Totales!

*Gustavo Rozo Páez*

## Tabla de Contenido

	Pág.
<b>Introducción .....</b>	<b>11</b>
<b>1. Objetivos .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Objetivo general .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>2. Marco teórico .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Calentamiento Eléctrico .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Calentamiento electromagnético .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Efectos del calentamiento eléctrico sobre el petróleo .....</b>	<b>18</b>
2.3.1 La viscosidad .....	18
2.3.2 Incremento de la permeabilidad efectiva .....	18
2.3.3 Hinchamiento .....	19
2.3.4 Principales componentes del proceso de calentamiento electromagnético.....	19
<b>2.4 Modelado de calentamiento electromagnético .....</b>	<b>20</b>
2.4.1 Teorema Poynting .....	22
2.4.2 Régimen de flujo.....	23
2.4.3 Régimen de flujo estable.....	24
2.4.4 Energía disipada.....	24
2.4.5 Profundidad de Penetración .....	25
<b>3. Modelos matemáticos para el modelado de procesos de calentamiento electromagnético aplicado a yacimientos de crudo pesado. ....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Abernethy .....</b>	<b>26</b>

<b>3.2</b>	<b>Davletbaev .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3</b>	<b>Lui y Zhao.....</b>	<b>30</b>
<b>4.</b>	<b>Implementación de modelo matemático aplicado a fenómenos de calentamiento electromagnético. ....</b>	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>Estimación del radio de penetración. ....</b>	<b>34</b>
4.1.1	Estimación de la potencia a lo largo del radio de penetración.....	35
4.1.2	Estimación de la temperatura a lo largo del radio de penetración. ....	37
<b>5.</b>	<b>Creación del modelo de simulación del experimento de laboratorio. ....</b>	<b>38</b>
<b>5.1</b>	<b>Elección del software comercial para aplicación del modelo de simulación .</b>	<b>39</b>
<b>5.2</b>	<b>Configuración y elaboración del modelo de simulación.....</b>	<b>39</b>
5.2.1	Geometría de la malla de simulación.....	39
5.2.2	Características de las rocas presentes en el modelo de simulación. ....	42
5.2.3	Propiedades físicas de las rocas. ....	44
5.2.4	Propiedades térmicas de las rocas.....	45
5.2.5	Otras características del modelo de simulación. ....	46
5.2.6	Pozos presentes en el modelo .....	47
5.2.7	Fechas de simulación. ....	48
<b>6.</b>	<b>Algoritmo de integración del modelo de transferencia de calor por medio de radiación de ondas electromagnéticas al simulador comercial CMG-Stars.....</b>	<b>50</b>
<b>6.1</b>	<b>Creación del Algoritmo de integración del modelo al simulador comercial CMG-Stars</b>	<b>50</b>
6.1.1	Principio de funcionamiento del algoritmo.....	50
6.1.2	Función “HEATR”.....	51

<b>6.2</b>	<b>Evaluación del algoritmo y generación de keywords.....</b>	<b>52</b>
6.2.1	Datos necesarios para el funcionamiento del algoritmo .....	52
6.2.2	Creación de la interfaz gráfica del algoritmo.....	54
6.2.3	Programación del algoritmo en lenguaje Visual Basic.....	57
6.2.4	Creación de archivo .dat .....	59
<b>6.3</b>	<b>Ajuste de los valores de transferencia de calor al simulador CMG-STARs.</b>	<b>60</b>
<b>7.</b>	<b>Análisis y resultados .....</b>	<b>61</b>
7.1	Comportamiento de la temperatura en el modelo de Bientinesi, et al. ....	62
7.2	Resultados obtenidos por la simulación realizada en CMG STARs .....	63
7.3	Comparación de resultados de la simulación con la obtenida experimentalmente.....	65
7.4	Análisis de la comparación de los resultados .....	66
<b>8.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>67</b>
<b>9.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>68</b>
	<b>Referencias.....</b>	<b>70</b>

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Configuración de los datos para la simulación numérica.</i> .....	34
Tabla 2. <i>Datos utilizados para la estimación de potencia de penetración de la onda</i> .....	35
Tabla 3. <i>Distribución de la potencia en función del radio.</i> .....	35
Tabla 4. <i>Características de los fluidos y la roca presentes en el medio poroso</i> .....	38
Tabla 5. <i>Parámetros necesarios para cálculo de la curva de temperatura.</i> .....	38
Tabla 6. <i>Datos insertados como propiedad de la formación en el modelo.</i> .....	45
Tabla 7. <i>Datos insertados en el modelo como propiedades térmicas.</i> .....	45
Tabla 8. <i>Datos necesarios para el cálculo de la tasa de calor transmitida.</i> .....	52
Tabla 9. <i>Bitácora del experimento.</i> .....	53

### **Lista de Apéndices**

**Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca**

**UIS.**

Apéndice A: Algoritmo de integración del modelo de transferencia de calor por medio de radiación de ondas electromagnéticas al simulador comercial CMG-Stars.

Apéndice B: Modelo de simulación del experimento de laboratorio planteado por Bientinesi, et al.

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Componentes de un sistema de calentamiento electromagnético</i> .....	19
Figura 2. <i>Esquema del arreglo experimental realizado por Bientinesi, et al.</i> .....	33
Figura 3. <i>Ubicaciones de los sensores térmicos instalados en el modelo experimental.</i> .	40
Figura 4. <i>Parámetros y dimensiones definidas para la creación de la malla.</i> .....	41
Figura 5. <i>Malla representativa del modelo experimental.</i> .....	42
Figura 6. <i>Distribución de los tipos de roca representados en la malla de simulación.</i> ....	44
Figura 7. <i>Pozo horizontal llamado: “ventilación”</i> .....	48
Figura 8. <i>Fechas de simulación definidas</i> .....	49
Figura 9. <i>Interfaz gráfica del algoritmo de simulación.</i> .....	54
Figura 10. <i>Área de introducción de datos del algoritmo listados en la tabla 8.</i> .....	55
Figura 11. <i>Tabla de los datos expuestos en la tabla 9.</i> .....	56
Figura 12. <i>Área de elección de directorio de guardado del archivo .dat.</i> .....	57
Figura 13. <i>Código fuente del algoritmo, programado en Visual Basic de Excel.</i> .....	58
Figura 14. <i>Archivo .dat creado por el algoritmo.</i> .....	59
Figura 15. <i>Archivo modificado del modelo de simulación en CMG-STARS.</i> .....	61
Figura 16. <i>Comportamiento de la temperatura en la investigación de Bientinesi, et al.</i> .	63
Figura 17. <i>Comportamiento de la temperatura en la simulación.</i> .....	65
Figura 18. <i>Gráfica comparativa de Bientinesi, et al., y la simulación en CMG.</i> .....	66

## Resumen

**Título:** Metodología para la simulación de un proceso de calentamiento electromagnético en la recuperación de crudos pesados usando un simulador de yacimientos comercial (CMG-STARS).

\*

**Autores:** Gustavo Rozo Páez, Lizeth Daniela Pardo Heredia. \*\*

**Palabras Clave:** Calentamiento electromagnético, Simulación, Métodos de recobro mejorado.

### Descripción:

El presente proyecto se desarrolla con la investigación y recopilación de los modelos matemáticos existentes para el modelado de procesos de calentamiento electromagnético aplicado a yacimientos de crudo pesado por medio de revisión bibliográfica. Luego, con ayuda del modelo de Abernethy estudiado se implementó un modelo matemático que permita predecir el incremento de la temperatura en el medio poroso como una función del tiempo, el radio y otras variables del yacimiento.

Luego, con la ayuda de la herramienta Visual Basic en Microsoft Excel, se desarrolló un algoritmo que permita la integración del modelo matemático a CMG-STARS simulando el calor adicional que se transmite hacia el medio poroso y los fluidos en la roca, debido a que este software no tiene la capacidad de simular este fenómeno por si mismo, por último se aplica el algoritmo en CMG-STARS simulando un proceso de calentamiento electromagnético a escala de laboratorio para un sistema agua-crudo pesado basado en la investigación realizada por Bientinesi, et al. que realizo un modelo experimental representando el fenómeno de transferencia de calor por ondas electromagnéticas.

Por último, se realiza la comparación de los datos del comportamiento de temperatura observados en la investigación de Bientinesi et al, y los obtenidos en la adaptación del algoritmo en el modelo de CMG realizado en la presente investigación.

Como Conclusión se encontró que el algoritmo de ajuste representa de forma precisa el comportamiento de entrega de calor por medio de radiación y realizo un acople moderadamente preciso a los datos obtenidos experimentalmente.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de ingeniería de Petróleos, Director MSC. Andrés Felipe Ortiz Meneses.

### Abstract

**Title:** Methodology for the simulation of an electromagnetic heating process in the recovery of heavy crude oils using a commercial reservoir simulator (CMG-STARS). \*

**Authors:** Gustavo Rozo Páez, Lizeth Daniela Pardo Heredia. \*\*

**Keywords:** Electromagnetic heating, Simulation, Enhanced Oil Recovery.

### Descripción:

The present project is developed with the investigation and compilation of the existing mathematical models for the modeling of electromagnetic heating processes applied to heavy crude oil deposits by means of a bibliographic review. Then, with the help of the studied Abernethy model, a mathematical model was implemented to predict the increase in temperature in the porous medium as a function of time, radius and other reservoir variables.

Then, with the help of the Visual Basic tool in Microsoft Excel, an algorithm was developed that allows the integration of the mathematical model to CMG-STARS simulating the additional heat that is transmitted to the porous medium and the fluids in the rock, due to the fact that this software does not have the capacity to simulate this phenomenon by itself, finally the algorithm in CMG-STARS is applied simulating a laboratory scale electromagnetic heating process for a heavy oil-water system based on the research carried out by Bientinesi, et al. to the. I make an experimental model representing the phenomenon of heat transfer by electromagnetic waves.

Finally, the comparison of the data of the temperature behavior observed in the investigation of Bientinesi et al, and those obtained in the adaptation of the algorithm in the CMG model carried out in the present investigation is carried out.

As a conclusion, it was found that the adjustment algorithm accurately represents the behavior of heat delivery by means of radiation and made a moderately accurate coupling to the data obtained experimentally.

---

\* Degree work

\*\* Physics-chemicals' Engineering Faculty, Petroleum engineering School, Director MSc. Andrés Felipe Ortiz Meneses.

## Introducción

En el panorama mundial de la industria de los hidrocarburos, se denota que más de la mitad de las reservas de petróleo son clasificadas como crudo pesado y arenas bituminosas, por lo tanto, estos yacimientos son considerados algunos de los recursos más importantes a tener en cuenta para satisfacer la producción y demanda actual de energía para el futuro. Pero hay factores como la alta viscosidad y baja gravedad API propios de estos, que dan como resultado un bajo porcentaje de recobro de hidrocarburo, aproximadamente un 10% o menos por producción primaria.

Es por lo anterior, que es necesario acudir a métodos de recobro térmico, los cuales, gracias al aumento de la temperatura, y reducción de su viscosidad se evidencia un aumento en su porcentaje de recobro. Entre estos métodos de recobro térmico destacan el drenaje gravitacional asistido por vapor (SAGD), la inyección de fluidos a alta temperatura como el vapor o agua caliente, estimulación cíclica de vapor (CSS), entre otros.

Una gran desventaja a evidenciar en estos métodos es que muchas veces tienen limitaciones y normativas ambientales muy estrictas además del alto costo energético y económico en la generación del vapor, y depende del tipo de yacimiento pueden ser o no aptos para su desarrollo en campo.

Siempre es importante buscar métodos de recobro más eficaces para el desarrollo de un proyecto de extracción de hidrocarburos, es por esto que más recientemente ha aumentado el interés en el uso del calentamiento eléctrico y electromagnético para superar ciertos desafíos que afrontan los proyectos con otros métodos de recobro térmico basados en vapor (Vermeulen y McGee, 2000). La tecnología del calentamiento electromagnético gracias a un dispositivo que se inserta en el pozo, este al generar ondas electromagnéticas causa que se eleve la temperatura del

yacimiento en las zonas cercanas, y asimismo ayuda a reducir la viscosidad del crudo y por lo tanto aumentar su movilidad.

Al estudiar el comportamiento de estos procesos aplicados a los yacimientos, nos ayudamos en gran parte de la simulación numérica de yacimientos, ya que es uno de los recursos más usados y precisos para el cálculo de los parámetros necesarios en las diferentes etapas de los proyectos a aplicar. Pero desafortunadamente no existe un simulador que nos ayude a modelar los procesos de calentamiento electromagnético.

Sin embargo, debido a la falta de un simulador o herramienta numérica que sea capaz de determinar los fenómenos que se encuentra asociados al calentamiento electromagnético en un yacimiento de crudo pesado, el presente trabajo de grado pretende plantear una metodología para realizar dicho modelamiento y trazar un acercamiento a los fenómenos que se desenvuelven en este proceso gracias a la ayuda del simulador CMG - STARS de la compañía Computer Modelling Group.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo general

Metodología para la simulación de un proceso de calentamiento electromagnético en la recuperación de crudos pesados usando un simulador de yacimientos comercial (CMG-STARS).

### 1.2 Objetivos específicos

- Estudiar los modelos matemáticos existentes para el modelado de procesos de calentamiento electromagnético aplicado a yacimientos de crudo pesado por medio de revisión bibliográfica.
- Implementar un modelo matemático que permita predecir el incremento de la temperatura en el medio poroso como una función del tiempo, el radio y otras variables del yacimiento.
- Desarrollar un algoritmo que permita la integración del modelo matemático a CMG-STARS simulando el calor adicional que se transmite hacia el medio poroso y los fluidos en la roca.
- Aplicar el algoritmo en CMG-STARS simulando un proceso de calentamiento electromagnético a escala de laboratorio para un sistema agua-crudo pesado.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Calentamiento Eléctrico

El calentamiento eléctrico puede clasificarse de dos formas, según la forma como se entrega la energía eléctrica y según la frecuencia y en lo que respecta a la entrega de la energía eléctrica existe el calentamiento directo y calentamiento indirecto, y por el tipo de frecuencia tenemos corrientes de baja frecuencia que están entre 50 - 60 Hz que se utilizan en los métodos de calentamiento resistivos/Óhmicos, corrientes de alta frecuencia que van en un promedio de 4250 MHz, cabe recalcar que cada tipo de calentamiento dependerá de las condiciones del yacimiento y la completamiento del pozo.

El calentamiento directo es el de tipo óhmico este método ocurre en las cercanías de la cara de los pozos, un par de pozos productores pueden actuar de ánodo y cátodo aplicando un diferencial de potencial eléctrico entre ambos pozos y el agua del yacimiento actúa como conductor para la corriente, en el cual el material a calentar actúa como resistencia al flujo de la corriente eléctrica.

Para generar las ondas de radio frecuencia se usa una válvula de vacío para generar la microonda, entre las válvulas de vacío se destacan los tríodos, las klistrón y los tubos de onda progresiva TWT, las ondas generadas son transferidas a través de dos electrodos en paralelo y el material a ser calentado se coloca entre los dos electrodos, (Holguín, 2021)

El indirecto es el calentamiento dieléctrico en el cual la energía eléctrica es convertida en radiación electromagnética no ionizante, como por ejemplo las ondas de radio frecuencia que van en el espectro electromagnético desde 0.003 a 300 MHz, y las ondas microondas que van en el espectro electromagnético desde 300 y 300000 MHz, y para logra esta frecuencia utilizamos un magnetrón, ocasionando que las microondas generadas son transferidas mediante una guía de

ondas dirigidas a el cuerpo que se desea calentar( hidrocarburo pesado), y a su vez para mejorar la distribución de esta se debe usar un deflector. (Holguín, 2021).

## **2.2 Calentamiento electromagnético**

Uno de los métodos para aumentar el factor de recobro es el calentamiento electromagnético, generando calor en el pozo o en el yacimiento, mediante ondas electromagnéticas que provienen de cables o estructuras metálicas que son administradas y monitoreadas desde la superficie. Las ondas electromagnéticas fueron predichas por maxwell en 1864, pero en 1888, Hertz fue quien demostró la existencia de ondas electromagnéticas, una de las aplicaciones del método de microondas es el horno de microondas. (Holguín, 2021).

El calentamiento electromagnético consiste en que una onda electromagnética es expulsada por el dispositivo emisor para ello se puede utilizar ya sea una válvula de triodo o una válvula de magnetrón, hasta el yacimiento con petróleo crudo, mientras la onda se empieza a propagar por el yacimiento, los fluidos y la roca no permite que la onda fluya libremente ya que estas proveen resistencia, la intensidad de la onda se va atenuando y la energía de esta se transforma en calor, y esta a su vez irradia la formación produciendo que las moléculas del agua y todas las que pueden formar dipolos, roten o vibren por la presencia de un campo eléctrico, el movimiento de los dipolos también causa fricción de esta manera generaríamos calor, la velocidad de este movimiento es proporcional a la frecuencia de alternancia del campo eléctrico, semejante movimiento de las moléculas resulta en un calentamiento significativo del cuerpo irradiado.

Al utilizar este principio nos damos cuenta que durante el tiempo de implementación del método de calentamiento electromagnético, encontramos que es libre de compuestos tóxicos, no produce humo, se puede usar fuentes renovables para lograr generar las ondas electromagnéticas,

para poder calentar el crudo el procedimiento es sencillo y los equipos de subsuelo operados desde la superficie cuentan con un sistema de apagado y encendido rápido. (Holguín, 2018).

## **2.3 Efectos del calentamiento eléctrico sobre el petróleo**

### **2.3.1 La viscosidad**

La viscosidad es una propiedad que poseen los fluidos, es una medida que se refiere a la resistencia durante su desplazamiento mutuo entre dos capas líquidas, y su deformación, la viscosidad del crudo depende directamente de la presión y temperatura, a mayor temperatura la viscosidad empieza a disminuir, pero con la presión entre mayor sea esta la viscosidad será mayor, mientras que un decremento de presión en la cantidad de gas en solución en el líquido disminuye la viscosidad, siendo la cantidad de gas en solución una función directa de la presión. (Helbing, 1985). En el petróleo crudo la viscosidad es uno de los parámetros que puede ser afectado por el cambio de temperatura, el calentamiento eléctrico debido a la temperatura que logra elevar el yacimiento hace que la viscosidad del petróleo crudo disminuya entonces el petróleo adquiere una relación de movilidad más favorable o bien su flujo será mayor, este es el objetivo de administrar calor a la formación mediante las ondas electromagnéticas (Mott, 1996).

### **2.3.2 Incremento de la permeabilidad efectiva**

La permeabilidad efectiva del crudo incrementa gracias a los mecanismos electromagnéticos, por lo tanto, su movilidad aumenta y con ello, su producción, Aumenta aparentemente la permeabilidad absoluta en el caso de yacimientos de arenas, areniscas o lutitas hidratadas, puede aumentar aparentemente la permeabilidad absoluta, mientras se aplique corriente eléctrica, gracias a la Electro-Ósmosis.

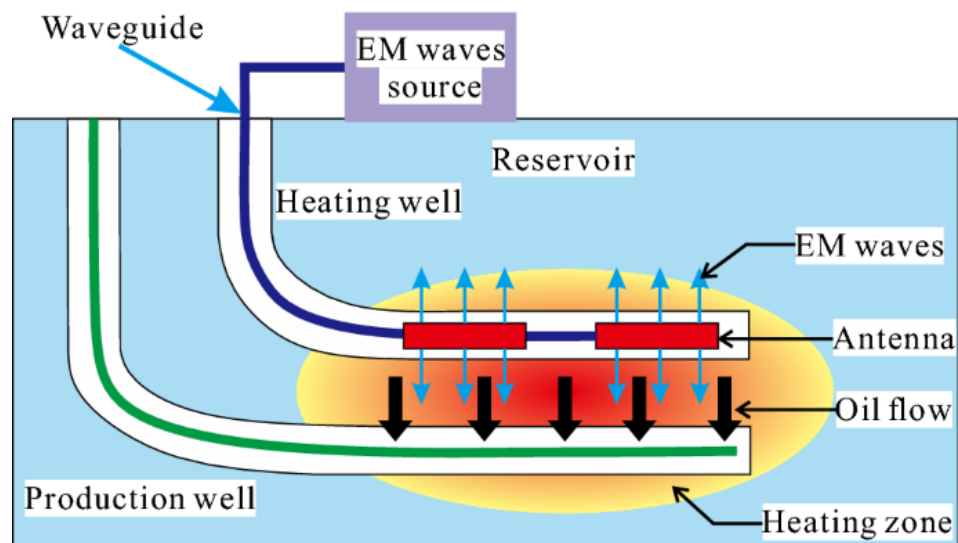
### 2.3.3 Hinchamiento

Junto con el incremento de temperatura, se manifiesta un incremento de presión que podría provocar que el crudo se hinche al hacer que fracciones de gas disuelto liberado se disuelvan nuevamente en el crudo (en el caso de yacimientos saturados), dependiendo de la presión, la temperatura y la composición del hidrocarburo. Aún si dichas fracciones de gas no se disolvieran nuevamente en el crudo, la entalpía del petróleo aumentaría provocando que de igual modo sus moléculas se hinchen.

### 2.3.4 Principales componentes del proceso de calentamiento electromagnético

Los principales componentes de una antena de calentamiento electromagnético para yacimientos de bitumen incluyen:

**Figura 1.** Componentes de un sistema de calentamiento electromagnético



Nota: tomado de Wang et al.

**2.3.4.1 Sistema de alimentación.** También conocido como el sistema de entrega de energía. Es el sistema encargado de suministrar energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del generador de señal y del sistema de control. Consiste en tuberías, cables o la combinación de ambos. Este sistema esencial provee los medios para transportar la energía de una manera eficiente y segura hasta la antena.

**2.3.4.2 Fuente de poder.** Es el dispositivo encargado de generar la señal electromagnética de alta frecuencia que se utilizará para calentar el yacimiento.

**2.3.4.3 Antena emisora.** Es el componente encargado de emitir la señal generada por el generador de señal hacia el yacimiento. Puede ser una antena dipolo, patch, hélice, entre otras.

**2.3.4.4 Sistema de medición.** Es el sistema encargado de medir la temperatura en diferentes puntos del yacimiento y de enviar estos datos al sistema de control para su procesamiento.

**2.3.4.5 Sistema de refrigeración.** Es el sistema encargado de mantener la temperatura de la antena y del generador de señal en niveles seguros para su funcionamiento.

**2.3.4.6 Caja de protección.** Es el componente encargado de proteger los componentes internos de la antena de la intemperie y de cualquier otro factor ambiental.

## 2.4 Modelado de calentamiento electromagnético

El parámetro  $\epsilon$  es conocido como una constante dieléctrica compleja (Ayappa 1997), en la cual dicho parámetro contiene una parte real  $\epsilon'$  que representa la capacidad que tiene un material para almacenar energía eléctrica y, una parte imaginaria  $\epsilon''$  que está asociada con la capacidad de disipación de energía térmica que posee el material. Aunque también se puede obtener una representación más general llamada ecuaciones complejas, tales como:

$$\epsilon' = Re(\epsilon) - \ln\left(\frac{\sigma}{\omega}\right) \quad (1)$$

Sin embargo, algunos autores prefieren obviar la parte compleja ejecutando una simplificación de la siguiente manera:

$$\epsilon' = \epsilon \quad (2)$$

$$\epsilon'' = \left(\frac{\sigma}{\omega}\right) \quad (3)$$

O expresarlas relacionándolas con el valor de la permitividad en el vacío de la siguiente forma

$$K'' = \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon_0}\right) K'' = \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon_0}\right) \quad (4)$$

Donde  $\kappa'$  es la constante dieléctrica relativa que describe la habilidad que tienen las moléculas para ser polarizadas por un campo eléctrico oscilante y  $\kappa''$  es el factor de pérdida dieléctrica relativa que mide la eficiencia en la cual la radiación electromagnética puede ser transformada en calor (Ayappa 1997).

Estas constantes son muy importantes porque nos ayudan a definir la profundidad de penetración de la onda y la capacidad de disipación del material en conjunto con otros parámetros como lo es la frecuencia. Ayappa en 1997 presentó la forma compleja de la siguiente manera:

$$K = \alpha + i\beta \quad (5)$$

Estos parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  dependen de las propiedades dieléctricas y la frecuencia de la onda.

$$\alpha + \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{k' \sqrt{1 + \tan^2 \delta + 1}}{2}} \quad (6)$$

La constante  $\alpha$  representa el cambio de fase de la onda de propagación y la relación entre las longitudes de ondas para la radiación electromagnética en el medio respecto al vacío, se expresa de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{2\pi}{a} \quad (7)$$

Por otro lado, la constante  $\beta$  es:

$$\beta = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{k'(\sqrt{1+\tan 2\delta})-1}{2}} \quad (8)$$

$\beta$  Es una constante de atenuación adimensional. Esta ecuación es muy importante, ya que, el inverso de ella  $\beta^{-1}$  nos ayuda a cuantificar la profundidad de penetración que adquiere la onda, en el medio que la absorbe, como se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$\beta^{-1} = \frac{c}{2\pi f} \sqrt{\frac{2}{k'(\sqrt{1+\tan 2\delta})-1}} \quad (9)$$

$$\tan \delta = \frac{k''}{k'} \quad (10)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (11)$$

#### 2.4.1 Teorema Poynting

Las ondas electromagnéticas como su palabra lo indica son ondas constituidas por un campo magnético y un campo eléctrico, estos campos viajan de manera simultánea y en forma sinusoidal. Estos campos están relacionados entre sí en cuanto a su magnitud como, por ejemplo, cuando ocurre un máximo del campo eléctrico también debe ocurrir un máximo del campo magnético, pero cada campo está asociado de forma independiente en cuanto a su dirección, es decir, el vector del campo magnético es perpendicular al vector del campo eléctrico y estos dos campos a su vez son perpendiculares al vector de propagación de la onda. En el mismo vector en que se propaga la onda, se manifiesta también de forma perpendicular el vector Poynting que es el vector que cuantifica la energía que transmite la onda al medio que dicha onda atraviesa. La magnitud de este vector representa la rapidez con la cual la energía fluye a través de una unidad de volumen donde la cara superficial del medio es perpendicular a la dirección de propagación de la onda, es decir, representa la unidad de potencia por unidad de volumen.

$$S = \frac{1}{\mu_0} E \times B \quad (12)$$

Y la siguiente ecuación se utiliza para representar la energía que disipa el medio en función de las propiedades dieléctricas, la frecuencia, la permitividad al vacío y el campo eléctrico (Ayappa 1997).

$$p(r) = \frac{1}{2} (2) \omega \epsilon_0 k'' E \cdot E \quad (13)$$

Conociendo esta ecuación podemos inferir que a altas frecuencias podemos suministrar mayor energía, pero con este tipo de frecuencia la onda tiene bajos valores de profundidad de penetración en el medio que se desea atravesar, es por eso, que se debe compensar estas dos situaciones utilizando una frecuencia que permita tener un óptimo en cuanto a la penetración y energía que se suministra, todo esto depende del objetivo que se quiere alcanzar. También debemos saber que la constante de pérdida dieléctrica depende de la frecuencia y en algunos casos esta distribución de valores en función con la frecuencia causa cambios muy significativos.

#### 2.4.2 Régimen de flujo

Estas ecuaciones describen un comportamiento para un radiador totalmente simple y básico y tomando en consideración la simetría radial del pozo. Sabiendo esto, se parte con un principio fundamental que ocurre en el proceso de transferencia de energía desde la onda electromagnética hacia el medio, primero se debe considerar el hecho de evaluar la transferencia de energía en una profundidad determinada del medio, luego se infiere por lógica, que la energía disipada en este punto por el medio es igual al cambio de energía que pierde la onda en el mismo instante que atraviesa este punto, al tener en cuenta que la única manera en que la onda electromagnética pierda energía.

$$\frac{d\phi}{dx} = -\frac{1}{2} \alpha_{ab} \phi(X) \quad (14)$$

$\phi(x)$  es la densidad de energía expresada en *Watts cm* 3.

$x$  es la coordenada de posición y se expresa en  $cm$ .

$\alpha_{ab}$  es el coeficiente de absorción y se encuentra expresado en  $1\ cm$ .

El coeficiente de absorción  $\alpha_{ab}$  es igual a:

$$\alpha_{ab} = 0.002\alpha_e \quad (15)$$

Donde  $\alpha_e$  es:

$$\alpha_e = \frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2} \left( \left( 1 + \left( \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) - 1 \right) \quad (16)$$

$$\frac{d\Phi(r)}{dx} = \left( \alpha_{ab} - \frac{1}{r} \right) \Phi(x) \quad (17)$$

### 2.4.3 Régimen de flujo estable

En este punto se analizará la distribución de la temperatura que ocurre en el medio en función del radio, cuando no existe variación de la temperatura en el tiempo además dentro de estas evaluaciones no se considerará el calentamiento por conducción.

$$T(r_0) = T_0 + \frac{P_0 e^{-a(r-r_0)}}{4.18 \rho_0 q_0 S_0} \quad (18)$$

### 2.4.4 Energía disipada

De las ecuaciones de Maxwell se puede derivar la siguiente expresión simplificada del poder disipado, o energía absorbida, o tasa de generación de calor en un volumen poroso  $V$  determinado es producido por el fenómeno de atenuación de la onda electromagnética y puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$(19)$$

Donde:

$$P_{ave} = w \epsilon_0 \epsilon'' E^2 V [\text{watts}]$$

$$P_{ave} = \sigma E^2 V [\text{watts}/m^3]$$

$E$  = la fuerza del campo eléctrico generalmente en [voltios/metro]  $F$  = la frecuencia del microondas [Hz]

$\epsilon_0$  = la permitividad del espacio libre =  $8.8541878176 \times 10^{-12}$  F/m

$\epsilon''$  = el factor de pérdida dieléctrica

$\omega$  = Frecuencia angular =  $2\pi f$  siendo  $f$  la frecuencia

$\sigma$  = conductividad eléctrica (mho/m) =  $\omega \epsilon_0 \epsilon''$  para altas frecuencias

### 2.4.5 Profundidad de Penetración

Es importante conocer la profundidad de penetración de la onda por debajo de la superficie del material a calentar, ésta, es la distancia en la cual la potencia de una MO o una ORF disminuye  $e^{-1}$ , es decir, 36.8% de su valor transmitido. Nótese que, a mayor longitud de onda, es decir, menor frecuencia, se obtiene mayor penetración.

$$dp = \frac{P_0}{2\pi\sqrt{2\epsilon''}} \left( k'(\sqrt{1+\tan^2\delta}) - 1 \right)^{-0.5} \quad (20)$$

## 3. Modelos matemáticos para el modelado de procesos de calentamiento electromagnético aplicado a yacimientos de crudo pesado.

Es esencial describir los modelos matemáticos para el flujo de calor a través de la formación de yacimientos durante el calentamiento EM para aplicaciones prácticas. En realidad, esto se rige por la ecuación de conservación de la energía térmica en el yacimiento. Bientinesi, et al. describió las condiciones iniciales y de contorno necesarias para una geometría esférica 1D

utilizando el software COMSOL Multiphysics. Las condiciones iniciales y de contorno requeridas son:

- Selección de la ecuación térmica adecuada para el modelo.
- Distribución uniforme de temperatura para todo el dominio.
- El límite debe ser adiabático.
- Igualación de temperatura inicial y temperatura constante en el límite exterior.
- Una ecuación estacionaria de primer orden para la atenuación de ondas electromagnéticas.
- Condición de contorno en el pozo donde la potencia total será irradiada por la antena.
- La distribución de temperatura en el calentamiento por RF de un yacimiento de crudo pesado utilizando una antena instalada dentro de un pozo obedece a la ecuación de conservación de la energía térmica. La ecuación gobernante se puede establecer de la siguiente manera:

$$\rho_{eff} C_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \times (K_{eff} \nabla T) = q \frac{d\psi(x)}{dx} = -\alpha_{abs} \psi \quad (21)$$

Donde  $\rho_{eff} C_{eff}$  y  $K_{eff}$  son la capacidad calorífica efectiva, y la conductividad térmica efectiva de los materiales del yacimiento respectivamente, y  $q$  es el término de fuente de calor EM que describe la liberación de energía por unidad de tiempo y unidad de volumen.

### 3.1 Abernethy

Fue el primero que mostró la solución matemática y el modelo para calcular la distribución de temperatura por calentamiento EM para la producción de crudo pesado. Aquí, describimos brevemente el modelo con la forma correcta de usar las ecuaciones. Es importante aclarar cómo

los tres procesos de transferencia de calor, es decir, radiación, convección y conducción, contribuyen a la distribución de la temperatura dentro del yacimiento.

Si consideramos un medio lineal de conductividad homogénea y la propagación de la radiación actuando en la dirección +x, entonces se sigue la siguiente relación:

$$\frac{d\psi(x)}{dx} = -\alpha\psi(x) \quad (22)$$

Donde  $\psi(x)$  es la densidad de energía (W/cm<sup>2</sup>),  $\alpha_{abs}$  es el coeficiente de absorción de energía (1/cm), y x es coordenada positiva (cm).

El coeficiente de absorción de energía ( $\alpha_{abs}$ ) depende principalmente de las propiedades de los materiales absorbentes presentes en el medio y se puede presentar de la siguiente manera:

$$\alpha = 0.02 \alpha_e \quad (23)$$

$$\alpha_e = \left\{ \frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2} \left( 1 + \left[ \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right]^2 \right)^{1/2} - 1 \right\}^{1/2} \quad (24)$$

donde  $\alpha_e$  es el coeficiente de absorción del campo eléctrico (1/m),  $\omega$  es la frecuencia angular ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  es frecuencia),  $\mu$  es la permeabilidad (H/m),  $\epsilon$  es la permitividad (F/m), y  $\sigma$  es la conductividad (mho/m).

La ecuación generalizada final, que es responsable de la distribución de temperatura  $T(r, t)$  para conocer el efecto del calentamiento por radiación sobre el flujo del pozo, se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{2\pi r h \rho_t S_t} \left\{ \frac{\alpha e^{-\alpha(r-r_0)r}}{4.18} + \rho_o q_o S_o \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} \quad (25)$$

donde  $r$  y  $h$  son el radio y la altura del cilindro definido donde la energía se irradia a través de él,  $r_0$  es el radio del pozo,  $S_o$  es el calor específico del crudo,  $\rho_o$  es la densidad del aceite,  $q_o$  es

el caudal (cc/s),  $\rho_t$  es la densidad (g/cc), y  $S_t$  es el calor específico del total de crudo, agua y roca (Cal/g/°C), respectivamente.

El proceso se puede modelar para las condiciones de estado estacionario y transitorio. La distribución de temperatura en estado estacionario se puede expresar como:

$$\theta(r) = T_0 + \frac{P_0 e^{-\alpha(r-r_0)}}{4.18 \rho_o q_o S_o} \quad (26)$$

dónde  $\theta(r)$  es la distribución de temperatura resultante,  $T_0$  es la temperatura inicial del yacimiento, y  $P_0$  es la potencia total radiada en watts.

En caso de distribución de temperatura transitoria, existen tres posibilidades de solución, tales como *temperatura transitoria -flujo constante, sin flujo y flujo creciente*. Las soluciones se dan a continuación:

- 1) En caso de temperatura transitoria con flujo constante, la temperatura aumenta constantemente a un caudal constante. La siguiente ecuación es la expresión de la distribución de temperatura transitoria en el caso de una tasa de flujo constante hacia el pozo:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{\rho_o e^{\alpha r_o}}{4.18 \rho_o q_o S_o} \left\{ e^{-\alpha r_o} - e^{-\alpha \sqrt{r^2 + 2At}} \right\} \quad (27)$$

- 2) Para la temperatura transitoria sin flujo, la ecuación se da como:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{\alpha P_0 e^{-\alpha(r-r_0)} t}{4.18 (2\pi h \rho_t S_t) r} \quad (28)$$

- 3) La temperatura transitoria con un caudal creciente es crítica para expresar la ecuación gobernante. La integración de pasos de tiempo finitos es necesaria para desarrollar la ecuación.

### 3.2 Davletbaev

Matemáticamente modeló la producción de crudo pesado combinando la tecnología de irradiación RF-EM en pozos fracturados hidráulicamente para yacimientos compactos de crudo pesado. Ellos utilizaron la siguiente ecuación para calcular el caudal del aceite:

$$Q_o = 2hw_f \left[ \frac{k_f}{\mu_o} \frac{\partial P_f}{\partial x} \Big|_{x-w_f/2} + \frac{k_m}{\mu_o} \frac{\partial P_m}{\partial y} \Big|_{x-w_f/2} \right] \quad (29)$$

dónde  $h$  es la altura de la fractura y el espesor de la formación,  $w_f$  es el ancho de fractura,  $k_f$  y  $k_m$  son la permeabilidad de la fractura y la matriz,  $\mu_o$  es la viscosidad a la temperatura inicial, y  $P_f$  y  $P_m$  son la presión de la fractura y la matriz.

También modelaron matemáticamente otra condición de tasa de flujo de crudo desde la matriz hasta la fractura para un yacimiento con onda EM. La ecuación se da como:

$$q_o = -4 \int_0^{x_f} \frac{k_m}{\mu_o} \frac{\partial P_m}{\partial y} \Big|_{x-w_f/2} dx - 4 \int_0^{w_f/2} \frac{k_m}{\mu_o} \frac{\partial P_m}{\partial x} \Big|_{x-x_f} dy \quad (30)$$

donde  $x_f$  es la mitad de la longitud de la fractura.

Davletbaev et al. También obtuvo la distribución de ondas EM en caso de calentamiento por RF-EM. Discutieron el concepto de absorción de ondas RF-EM en componentes polares. Para describir adecuadamente la distribución de la onda RF-EM y la generación de calor ( $q$ ), usaron la siguiente ecuación:

$$q = \frac{\omega \varepsilon_o \varepsilon' tg\delta}{2} E^2 \quad (31)$$

dónde  $\omega$  es la frecuencia de las ondas EM (MHz),  $\varepsilon_o$  es constante eléctrica,  $\varepsilon'$  es la permitividad relativa del medio al líquido,  $tg\delta$  es la tangente de pérdida dieléctrica (disipación), y  $E$  es la intensidad del campo eléctrico.

En este artículo, utilizaron un modelo para describir una operación no estacionaria del pozo de producción y el tratamiento RF-EM en el área de fondo de pozo. Se utilizó un conjunto de

ecuaciones diferenciales, para describir adecuadamente todos los procesos asociados con la operación de calentamiento por RF-EM.

### 3.3 Lui y Zhao

Utilizaron formulaciones matemáticas para un flujo radial transitorio monofásico en el método EM. Para propósitos de modelado, asumieron un yacimiento isotrópico. Bajo calentamiento EM en condiciones de yacimiento, la ecuación de conservación de energía total para el flujo radial monofásico 2D (en coordenadas r-z) se da de la siguiente manera:

$$(M_r(1 - \phi) + \phi M_o S_o) \frac{\partial T}{\partial t} = (M_o u_o) \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_m r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_r \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha_e \frac{Q_{em} \exp(-\alpha(r-r_w))}{r} \quad (32)$$

dónde  $\phi$  es la porosidad,  $k_m$  es la conductividad térmica efectiva del yacimiento incluyendo roca y petróleo,  $M$  es la capacidad calorífica volumétrica,  $S$  es calor específico,  $u$  es la velocidad del fluido, y  $\alpha_e$  es el coeficiente de absorción EM. El subíndice o, w, y r representan petróleo, pozo y roca, respectivamente.

También formularon el flujo de dos fases de crudo y gas con calentamiento EM. Se usó la siguiente ecuación para la conducción y la fuente de calor para representar el balance general de energía en el sistema:

$$\frac{\partial T}{\partial t} (\phi(M_w s_w + M_{nw} s_{nw}) + (1 - \phi)M_r) + (M_w \vec{u}_w + M_{nw} \vec{u}_{nw}) \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k_m \nabla T) = Q_{em} \quad (33)$$

dónde  $s$  es la saturación y los subíndices  $nw$  y  $w$  representan la fase no mojante y mojante, respectivamente.

En la actualidad, también se encuentran en fase de desarrollo otros trabajos de investigación sobre modelado matemático y simulación numérica. Las ecuaciones dadas

anteriormente son las fundamentales y pueden servir para el conocimiento primario del modelado matemático de EM para el recobro de crudo pesado en condiciones de yacimiento.

#### **4. Implementación de modelo matemático aplicado a fenómenos de calentamiento electromagnético.**

En los capítulos anteriores se han discutido los aspectos fundamentales relacionados con el diseño y modelado de un proceso de calentamiento electromagnético aplicado a la recuperación mejorada en yacimientos de crudo extra pesados y bitúmenes. Estos aspectos incluyen la comprensión de los principios físicos y termodinámicos involucrados en el proceso, la selección de las características geométricas y materiales del modelo, así como la identificación de los parámetros críticos para el diseño y la simulación del proceso.

El objetivo de discutir estos aspectos es proporcionar una base sólida para el desarrollo e implementación del modelo matemático en el presente capítulo. En este capítulo, se llevará a cabo la implementación del modelo matemático escogido y se analizará su comportamiento a través de la simulación. Esto se realizará tomando como base la investigación llevada a cabo por Bientinesi, et al., titulada: "A radiofrequency / microwave heating method for thermal heavy oil recovery based on a novel tight-shell conceptual design".

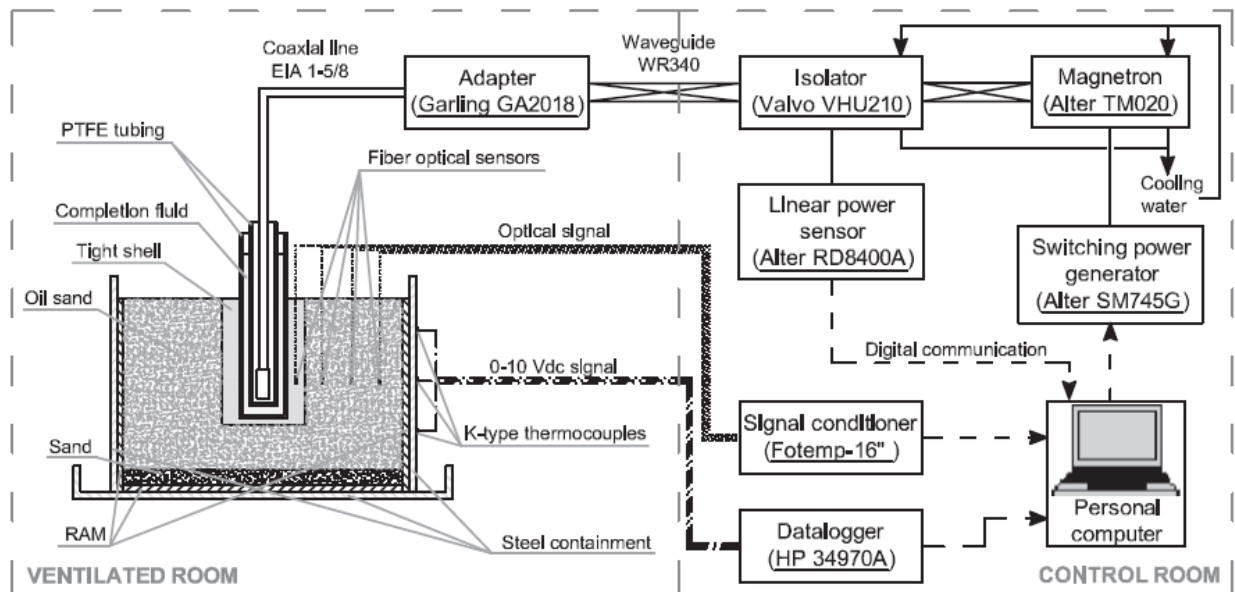
La implementación del modelo matemático se hará mediante el uso de un software específico como el CMG-STARS. A través de la simulación, se analizará el comportamiento del modelo y se comparará con los datos experimentales obtenidos en la investigación de Bientinesi, et al. Esto permitirá evaluar la validez y eficacia del modelo en la aplicación de la recuperación mejorada mediante calentamiento electromagnético en yacimientos de crudo extra pesados y bitúmenes. Además, se podrá obtener información valiosa sobre el comportamiento de los fluidos

y el calentamiento en el yacimiento, permitiendo así mejorar el diseño y las estrategias de recuperación.

Una vez realizada la simulación, se analizarán los resultados obtenidos y se compararán con los datos experimentales. Si los resultados son similares a los datos experimentales, significa que el modelo matemático es válido y puede ser utilizado para predecir el comportamiento del proceso en yacimientos reales. De lo contrario, se deben realizar ajustes en el modelo para mejorar su precisión.

La investigación mencionada se centra en el estudio del calentamiento electromagnético aplicado a la recuperación mejorada en yacimientos de crudo extra pesado y bitúmenes. Para lograr esto, se presenta un modelo a escala de laboratorio compuesto por 2000 kg de roca arenisca, que se encuentra dentro de una caja. Este modelo se somete a un proceso de calentamiento mediante una antena de emisión de ondas electromagnéticas, con el objetivo de alcanzar temperaturas cercanas a los 200°C.

En la figura 2 se muestra el arreglo experimental realizado en esta investigación, donde su característica principal es la demostración

**Figura 2.** Esquema del arreglo experimental realizado por Bientinesi, et al.

Nota: Tomado de Bientinesi, et al.

La idea detrás de este modelo es mostrar cómo el calentamiento electromagnético afecta la propagación de la onda de calor en la formación rocosa y en los fluidos presentes en ella. Esto se logra mediante el monitoreo constante de variables como la temperatura en varios puntos de control, lo que permite crear un perfil de temperatura. Este perfil de temperatura se utilizará más adelante para comparar con los datos experimentales y evaluar la validez del modelo.

La investigación llevada a cabo por Bientinesi, et al., proporciona una gran cantidad de datos y parámetros necesarios para el diseño y modelado de un proceso de calentamiento electromagnético aplicado a la recuperación mejorada en yacimientos de crudo extra pesados y bitúmenes. Estos datos son fundamentales para entender cómo las ondas electromagnéticas influyen en los parámetros del yacimiento y cómo estos afectan el comportamiento de las ondas.

En ese sentido, se registraron diferentes datos relacionados con el diseño experimental de la investigación, tales como las dimensiones del modelo experimental, las características petrofísicas de la roca utilizada, los parámetros de emisión de las ondas electromagnéticas

realizadas por la antena, las temperaturas, entre otros. Estos datos se encuentran relacionados en la tabla 1 y son esenciales para entender y analizar el comportamiento del modelo y su relación con las condiciones reales del yacimiento.

**Tabla 1.** Configuración de los datos para la simulación numérica.

Parámetro	Valor
Poder Transmitido	1000 W (para $0 < t < 29h$ )
Radio del pozo	47.5 mm
Radio del caparazón	125 mm
Radio del Tanque	650 mm
Temperatura Inicial	16°C
Temperatura de las paredes exteriores (condición de frontera),	$T_0 + 0.174t$ [min]
Temperatura de las paredes superior e inferior (condición de frontera),	$T_0$
Condición de frontera en el pozo	$\frac{dT}{dr} = 0.5$ K/mm
Permitividad de la corteza de arena	$2.9 - i0.001$
Permitividad de la arenisca con fluido	$3.8 - i0.1$
Densidad de la corteza de arena	1620 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico de la corteza de arena	900 J/kg/K
Conductividad térmica de la corteza de arena	0.1 W/m/K
Densidad de la arenisca con fluido	2000 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico de la arenisca con fluido	1020 J/kg/K
Conductividad térmica de la arenisca con fluido	0.8 W/m/K

Nota: Tabla adaptada de Bientinesi, et al.

#### 4.1 Estimación del radio de penetración.

El modelo de Abernethy es esencial para entender cómo las ondas electromagnéticas se propagan a través de las diferentes capas de roca en el yacimiento y cómo estas afectan la temperatura y la potencia de la onda. Al tomar en cuenta los datos especificados en la Tabla 1, se puede utilizar esta ecuación para estimar la potencia de la onda en diferentes puntos del modelo

experimental. Además, esto nos permite relacionar el cambio de variables como la potencia y la temperatura a lo largo de las capas de roca alrededor de la antena emisora de ondas electromagnéticas, lo cual es esencial para entender el comportamiento del proceso de calentamiento en el yacimiento.

$$P(r) = P_0 e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (34)$$

#### 4.1.1 Estimación de la potencia a lo largo del radio de penetración.

Con la ayuda de la herramienta Excel, se realiza una estimación de la potencia del modelo a lo largo de diferentes magnitudes de radio, conociendo la potencia inicial ( $P_0$ ), radio inicial ( $r_0$ ), y un valor de alfa ( $\alpha$ ) teórico que le asignamos de acuerdo a las condiciones dadas en el experimento.

Los datos ingresados se muestran a continuación en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Datos utilizados para la estimación de potencia de penetración de la onda

Parámetro	Valor	Unidad
Po	1000	Watts
Ro	4,75	cm
Alfa	0,025	1/cm

Al realizar el cálculo de este valor de potencia a lo largo del radio del experimento, obtenemos los valores de la Tabla 3.

**Tabla 3.** Distribución de la potencia en función del radio.

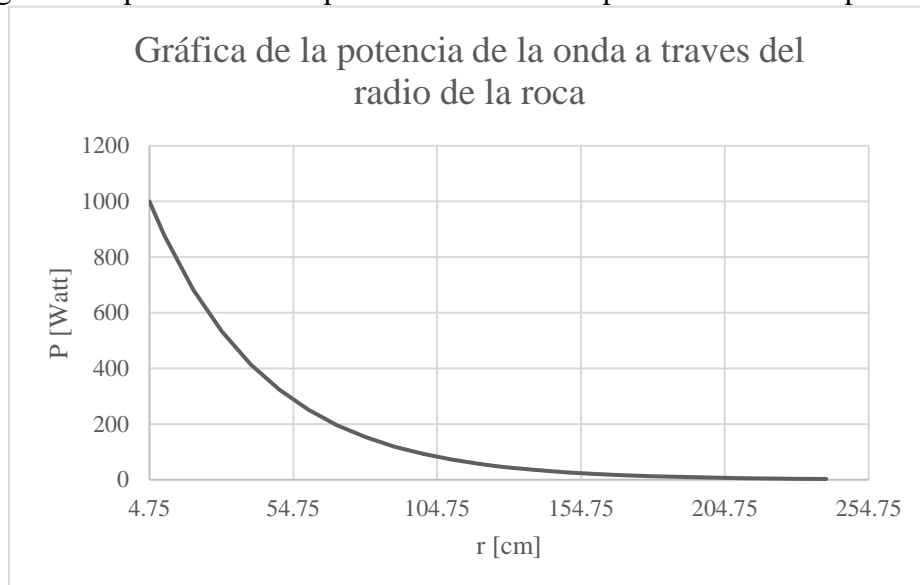
r [cm]	P [watts]
4,75	1000
10	876,9984974
20	683,0071165
30	531,9264772
40	414,264757
50	322,6297171
60	251,2642763
70	195,6848152

80	152,3994873
90	118,68884
100	92,43496156
110	71,98842045
120	56,06463822
125	49,47686957
130	43,66318415
140	34,004922
150	26,48305989
160	20,62502778
170	16,06278778
180	12,5097117
190	9,742573271
200	7,587523693
210	5,909169393
220	4,602065751
230	3,584092411
240	2,791293976

Agrupando los datos, obtenemos la siguiente gráfica:

**Gráfica 1.** Curva de potencia a lo largo del radio de penetración de la onda.

La gráfica 1 presenta una representación del comportamiento de la potencia de la onda



electromagnética a medida que esta penetra en la roca. Se puede observar cómo la potencia de la onda va disminuyendo a medida que se adentra en la roca, esto se debe a la resistencia que ejerce

la roca junto con los fluidos presentes en ella. Esta resistencia provoca que la onda se disipe a lo largo del radio, lo que hace que su potencia disminuya hasta llegar a valores cercanos a 0 en las condiciones de frontera. Esto es importante a tener en cuenta al momento de diseñar un proceso de calentamiento electromagnético para la recuperación mejorada de yacimientos de crudo extra pesado y bitúmenes, ya que permite entender cómo la onda se comporta y se distribuye en la roca y cómo esto afecta al proceso en general.

#### 4.1.2 Estimación de la temperatura a lo largo del radio de penetración.

A continuación, con ayuda de los datos tomados de la investigación, se procede a hallar la distribución de temperatura a lo largo del radio de penetración de la onda electromagnética. Para esto es necesario tomar de base la ecuación que el modelo de Abernethy relaciona para el cálculo de la propagación de temperatura.

$$T(r, t) = T_o \frac{\alpha \rho_o e^{-\alpha(r-r_o)} t}{4.18 (2\pi h \rho_t S_t) r} \quad (35)$$

Definiendo:

$$\rho_t = \rho_r(1 - \Phi) + \rho_o \Phi(1 - \sigma_w) + \rho_w \Phi \sigma_w \quad (36)$$

$$S_t = (\rho_r S_r(1 - \Phi) + \rho_o S_o \Phi(1 - \sigma_w) + \rho_w S_w \Phi \sigma_w) / \rho_t \quad (37)$$

Donde:

- $\phi$  = Porosidad de la roca.
- $\sigma_w$  = Saturación de agua connata
- $\rho$  = Densidad ( $gm/cm^3$ )
- r, o, w, t = roca, aceite, agua, total.

Los datos correspondientes a los parámetros de los fluidos presentes en el modelo se muestran a continuación en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Características de los fluidos y la roca presentes en el medio poroso

Parámetro	Valor	Unidades
Porosidad	0,4	
Sat. Connata Agua	0,25	
Densidad Aceite	2100	Kg/m <sup>3</sup>
Densidad Agua	1000	Kg/m <sup>3</sup>
Densidad Roca	1620	Kg/m <sup>3</sup>
Calor Esp. Agua	4180	J/kg*K
Calor Esp. Aceite	930	J/kg*K
Calor Esp. Roca	800	J/kg*K

Tomando en cuenta los valores en la Tabla 4, se hallan los valores de la densidad total ( $\rho_t$ ) y de la Saturación total ( $S_t$ ), con ayuda de las ecuaciones (36) y (37) respectivamente para obtener lo siguiente:

$$\rho_t = 1702 \text{ kg/m}^3 \quad (38)$$

$$S_t = 1046.709 \text{ J/kg.K} \quad (39)$$

Con ayuda de la ecuación (35) podemos obtener el modelo de distribución de temperatura a lo largo del radio de penetración de la onda.

**Tabla 5.** Parámetros necesarios para cálculo de la curva de temperatura.

Parámetro	Valor	Unidades
To	289,15	K
$\alpha$	0,025	1/ cm
Po	1000	Watts
ro	4,75	cm
h	75	cm
$\rho_t$	1,702	Kg/cm <sup>3</sup>
St	1046,709753	J/kg*K
t	20	s

## 5. Creación del modelo de simulación del experimento de laboratorio.

## **5.1 Elección del software comercial para aplicación del modelo de simulación**

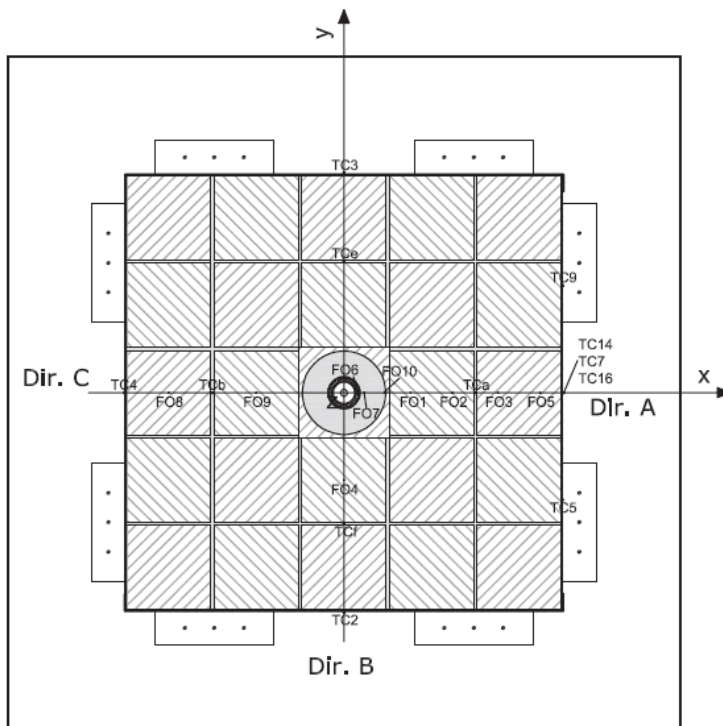
En la actualidad, existen varios softwares comerciales de simulación de yacimientos disponibles, pero ninguno de ellos tiene la capacidad de representar el método de recobro mejorado mediante calentamiento electromagnético. Sin embargo, el software de Computer Modelling Group (CMG) nos permite, mediante un algoritmo, generar unas "instrucciones" específicas para simular el viaje de la onda de calor aplicada por la antena de ondas electromagnéticas. Por esta razón, para este estudio, se utilizará el software CMG-STARS para implementar el algoritmo desarrollado.

## **5.2 Configuración y elaboración del modelo de simulación**

### **5.2.1 Geometría de la malla de simulación**

La elaboración de una malla de simulación precisa es esencial para entender y predecir el comportamiento del yacimiento. En este caso, se menciona que se utilizaron los datos suministrados en la investigación realizada por Bientinesi, et al. para definir la geometría del modelo. Se eligió una forma cilíndrica representativa con las características y dimensiones del experimento original.

En la figura 3 se muestra el arreglo experimental presentado por Bientinesi, et al. desde una vista superior, y gracias a este, se puede tomar las dimensiones y demás datos necesarios para crear la estructura del modelo a simular.

**Figura 3.** Ubicaciones de los sensores térmicos instalados en el modelo experimental.

Tomado de Bientinesi, et al.

La malla cilíndrica tiene un diámetro de 130 cm, es decir 65 cm de radio, y una altura de 75 cm, con un orificio en el centro de 6 cm de radio. Además, se dividió en 57 celdas radiales de 1 cm de espesor cada una. Esta geometría precisa permite simular de manera realista la propagación de las ondas electromagnéticas y el comportamiento de los fluidos en el yacimiento. La figura 4 proporciona una representación visual de esta malla de simulación, lo que permite verificar la precisión de la misma.

**Figura 4.** *Parámetros y dimensiones definidas para la creación de la malla.*

Create a Radial (Cylindrical) grid

K direction  
 Up  
 Down

Number of divisions

Along radius ("r" divisions)	57
Angular ("theta" divisions)	1
Along K direction	75

Inner radius of innermost block: 6  
Outer radius of outermost block: 63  
Sweep (max 360 degrees): 3.6E+002

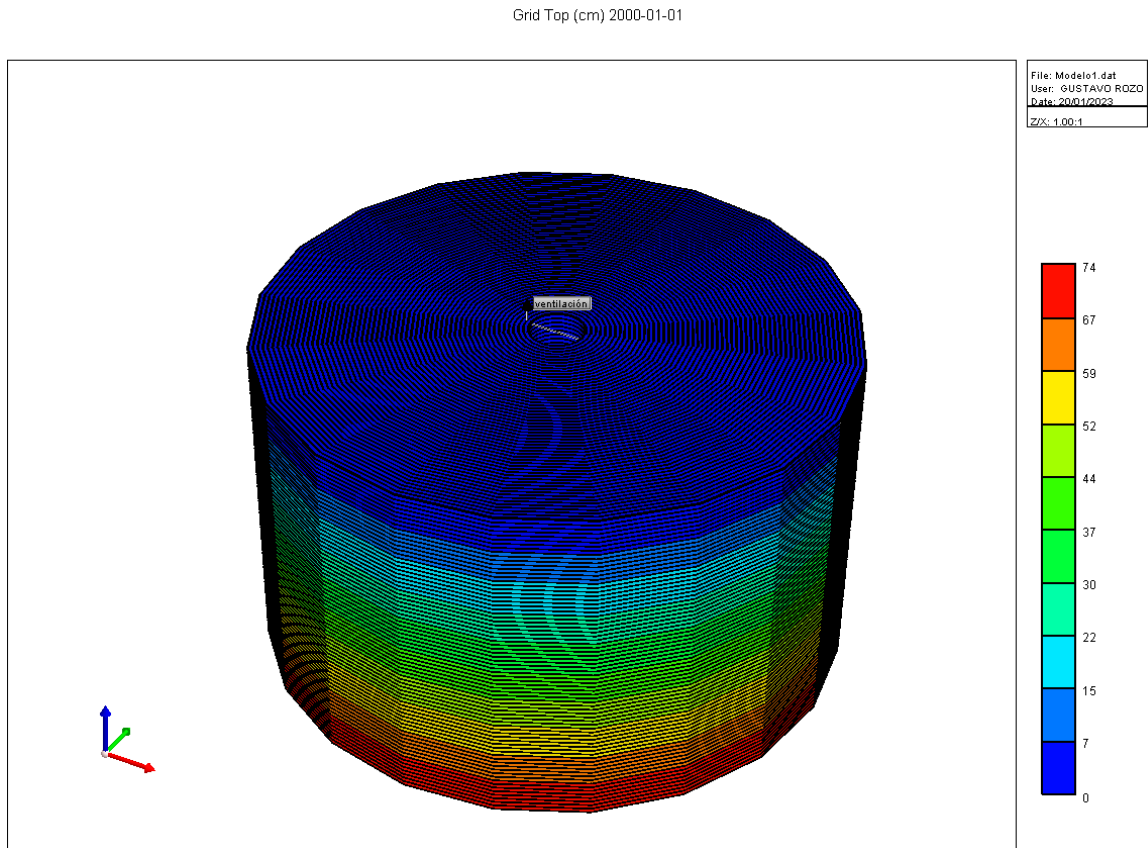
Calculate suggested grid block widths from above

Grid block widths

I-direction: 57\*1  
J-direction: 360

OK Cancel

CMG se encarga de crear la malla solicitada, dando como resultado la malla expuesta en la figura 3. Donde según la vista representada se puede evidenciar su geometría cilíndrica con las divisiones radiales antes comentadas.

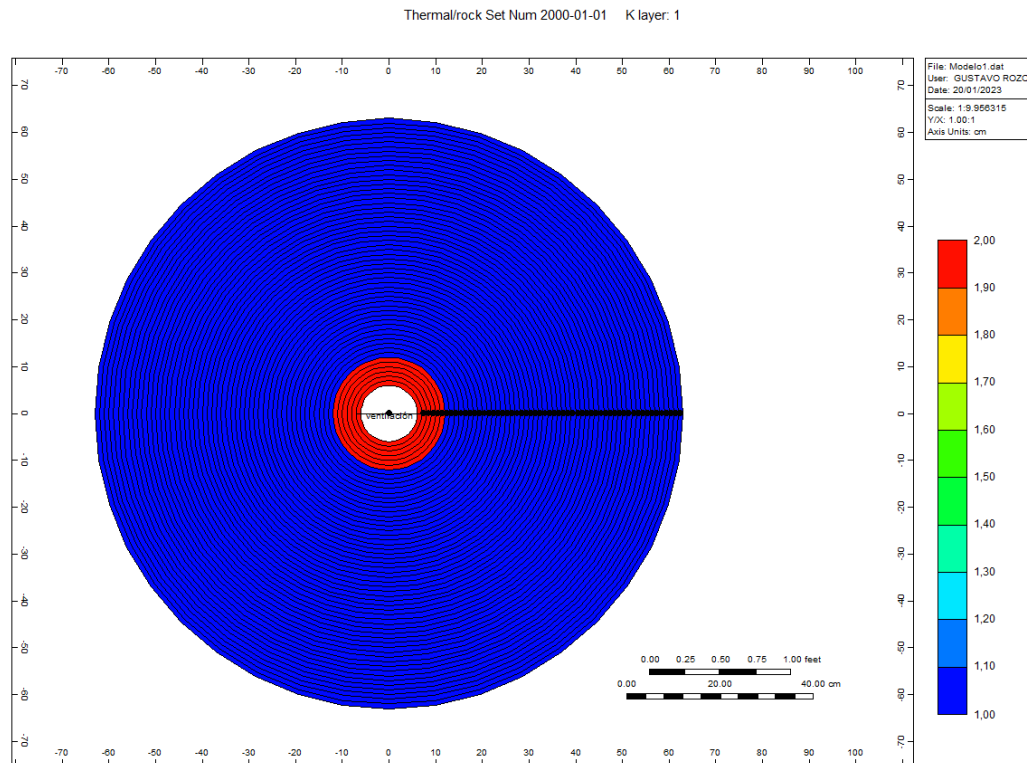
**Figura 5.** *Malla representativa del modelo experimental.*

### 5.2.2 Características de las rocas presentes en el modelo de simulación.

La representación de un modelo a escala del yacimiento es esencial para entender y predecir el comportamiento del mismo, pero es importante tener en cuenta que las condiciones en superficie pueden diferir de las presentes en la profundidad del yacimiento. Por esta razón, es crucial incluir una amplia variedad de características en el modelo para generar una mayor similitud con las condiciones reales. Esto incluye la geometría del yacimiento, la composición de las rocas, y la presencia de fluidos. Además, es fundamental considerar las propiedades térmicas y termodinámicas de las rocas y fluidos para poder realizar inferencias y predicciones precisas sobre la producción de hidrocarburos y la recuperación del mismo. En resumen, un modelo a escala preciso y completo es esencial para entender y predecir el comportamiento del yacimiento real.

La representación precisa de la geometría del yacimiento es esencial para entender y predecir el comportamiento del mismo. En este caso, se menciona que uno de los datos más importantes a tener en cuenta en el modelo es el orificio en la mitad que representa la antena de emisión de ondas electromagnéticas. Este orificio es una característica esencial para entender cómo las ondas electromagnéticas se propagan a través del yacimiento, y su dimensión precisa (6 cm de radio) es esencial para asegurar la precisión del modelo.

Además, se menciona que se manejan dos tipos de roca en el modelo: una capa de “tight Shell” que llaman los autores y que precede al orificio y tiene un espesor de 15 cm, y se utiliza como medio para la transmisión de las ondas por radiación, y una segunda capa de roca arenisca que contiene en su interior aceite, agua y aire, y ocupa el resto del volumen del modelo. La representación precisa de estos dos tipos de roca es esencial para entender cómo las ondas electromagnéticas se propagan a través del yacimiento y cómo los fluidos presentes en las rocas afectan a la propagación de las ondas. Esto se muestra en la figura 4, donde el área de color rojo corresponde al tipo de roca #2 o tight shell, y el área de color azul es correspondiente al tipo de roca #1 o la muestra de arenisca con los fluidos en sus espacios porosos.

**Figura 6.** *Distribución de los tipos de roca representados en la malla de simulación.*

### 5.2.3 Propiedades físicas de las rocas.

La formación representada en la malla del modelo, al igual que en el yacimiento real, posee una serie de propiedades tanto físicas como termodinámicas que son esenciales para entender y predecir su comportamiento. Es por ello que es esencial ajustar estas propiedades en el modelo con los datos experimentales obtenidos. Estos datos se obtienen a través de medidas directas y se deducen del artículo en cuestión, y son cruciales para asegurar la precisión del modelo. Es importante señalar que estas propiedades son listadas en la tabla 5 para su revisión y comparación con los datos experimentales. En resumen, la formación representada en el modelo requiere un ajuste preciso de sus propiedades tanto físicas como termodinámicas, utilizando datos experimentales confiables para asegurar la precisión del modelo, y estas propiedades son listadas en la tabla 6 para su revisión.

**Tabla 6.** *Datos insertados como propiedad de la formación en el modelo.*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Porosidad	40%
Saturación de Agua	0.012
Presión	103kPa
Permeabilidad	6000 mD

Nota: Adaptado de Bientinesi, et al.

#### 5.2.4 Propiedades térmicas de las rocas

Es importante señalar que el manejo de dos tipos de roca en el modelo experimental requiere un enfoque específico en cuanto a las propiedades térmicas debido a las diferencias en su composición. Estas propiedades son esenciales para poder entender y predecir el comportamiento térmico de cada roca en particular. Es por ello que es necesario asignar propiedades térmicas diferentes a cada tipo de roca, para poder obtener una representación precisa de su comportamiento en el modelo experimental. Además, es importante mencionar que estas propiedades son calculadas utilizando información presentada por Bientinesi, et al. Estos términos se presentan en la tabla 7, a continuación.

**Tabla 7.** *Datos insertados en el modelo como propiedades térmicas.*

<b>Propiedad</b>	<b>Tipo de Roca</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Capacidad calorífica volumétrica	1	1.953	J/(cm <sup>3</sup> *C)
Conductividad térmica	1	0.558	J/(cm*min*C)
Capacidad calorífica volumétrica de Overburden y Underburden	1	500	J/(cm <sup>3</sup> *C)
Conductividad térmica de Overburden y Underburden	1	3	J/(cm*min*C)
Capacidad calorífica volumétrica	2	1.296	J/(cm <sup>3</sup> *C)
Conductividad térmica	2	0.144	J/(cm*min*C)
Capacidad calorífica volumétrica de Overburden y Underburden	2	3000	J/(cm <sup>3</sup> *C)
Conductividad térmica de Overburden y Underburden	2	15	J/(cm*min*C)

### **5.2.5 Otras características del modelo de simulación.**

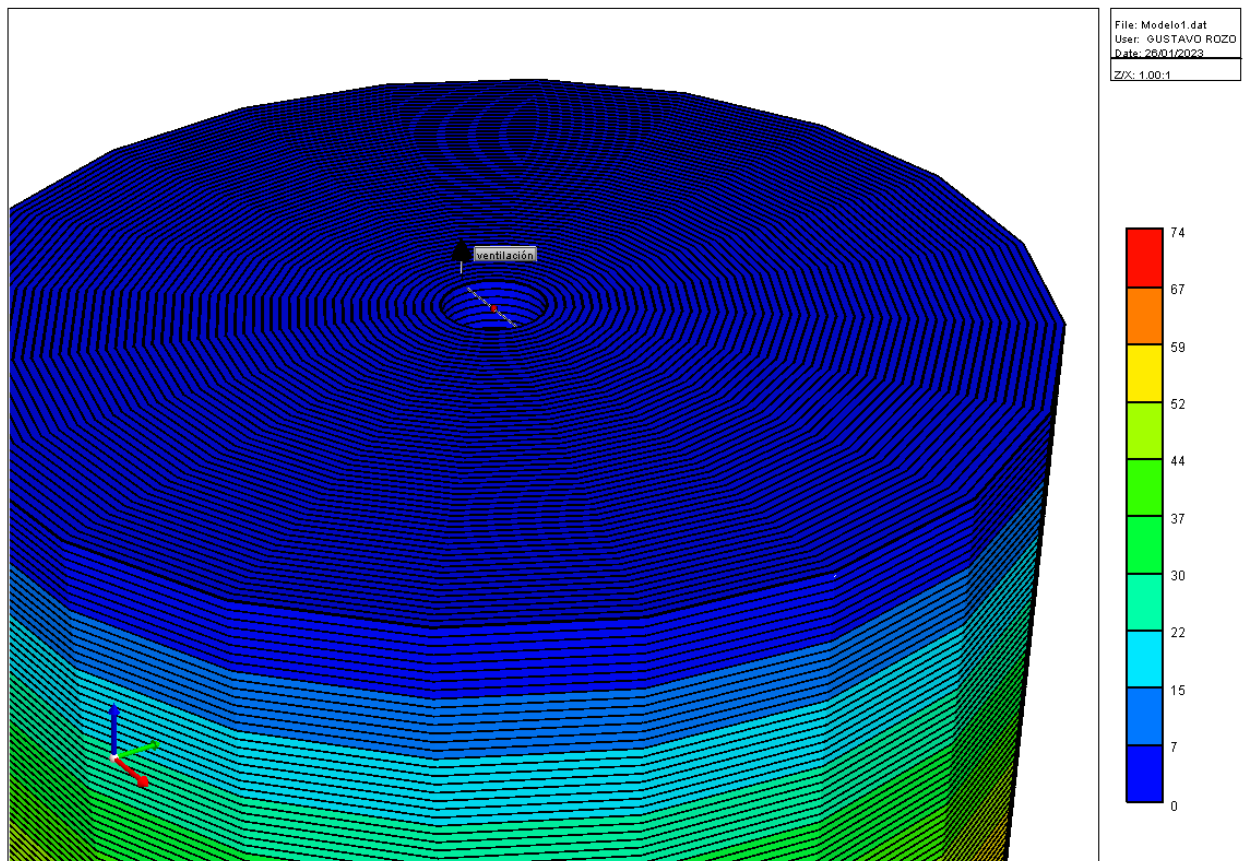
En la investigación presentada por Bientinesi, et al, el objetivo principal es analizar cómo el calentamiento electromagnético aplicado a través de una antena de emisión de ondas electromagnéticas influye en la propagación de la onda de calor en una muestra de roca arenisca de 2000 kg. Para ello, se llevó a cabo un modelo experimental a escala de laboratorio en el que se monitorearon variables como la temperatura en varios puntos de control, con el fin de crear un perfil de temperatura. Sin embargo, es importante mencionar que el modelo experimental utilizado no cumple los requerimientos técnicos mínimos para simular condiciones de presión, confinamiento y saturaciones cercanas a las reales de las rocas presentes en un yacimiento debido a que está expuesto a condiciones de ambiente. Por esta razón, la presente investigación no se centra en observar el comportamiento de parámetros y factores que representen el movimiento de los fluidos presentes en la muestra, ni tampoco elevaciones de presión o cambios en la saturación de las fases líquida y gaseosa del crudo, así como el cambio en la saturación de agua y demás fenómenos y parámetros similares dentro de la simulación.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que a pesar de que el modelo experimental utilizado en la investigación de Bientinesi, et al. no cumpla con los requerimientos técnicos mínimos para simular condiciones reales de yacimientos, sí nos permite obtener una idea clara del comportamiento del calentamiento electromagnético en una muestra de roca y cómo afecta a la elevación de la temperatura en toda la formación. Además, los datos obtenidos en este modelo experimental pueden ser utilizados como base para futuras investigaciones en las cuales se desee analizar el comportamiento de los fluidos presentes en la muestra y cómo estos afectan al proceso de recuperación mejorada.

### 5.2.6 Pozos presentes en el modelo

La representación precisa de las condiciones en la parte superior del yacimiento es esencial para entender y predecir el comportamiento del mismo. El modelo experimental o maqueta realizada por Bientinesi, et al. está expuesto al aire libre o condiciones de superficie, lo que significa que se requiere simular las condiciones de exposición al ambiente en el modelo. Sin embargo, el software de simulación utilizado en la investigación se enfoca en simular condiciones de yacimiento confinadas, y no está diseñado para simular la disipación de calor o evaporación de fluidos en las condiciones de superficie.

Para superar esta limitación, la forma más ingeniosa de simular esta condición en el modelo es a través de la inclusión de un pozo que atraviesa la capa superior de la formación de forma horizontal, al cual lo identificamos como “ventilación”, como se observa en la figura. Esto permite simular el efecto deseado de estar expuesto al ambiente y representar correctamente las condiciones en la parte superior del yacimiento. Además, esta técnica también permite simular procesos como la extracción de fluidos y la ventilación del yacimiento.

**Figura 7.** Pozo horizontal llamado: “ventilación”

### 5.2.7 Fechas de simulación.

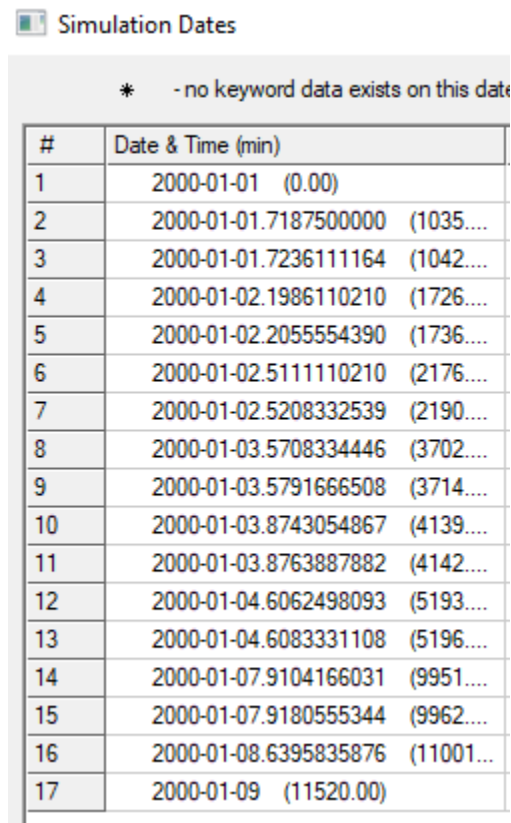
En la investigación llevada a cabo por Bientinesi, et al., se logró realizar un experimento de 13 días consecutivos mediante el uso de un modelo de antena emisora a escala para emitir ondas electromagnéticas. Con base en esto, se configuró la duración de la simulación en el presente modelo desde una fecha inicial el día 1 de enero del año 2.000 hasta el día 15 de enero del año 2.000, tomando un período de 15 días, el cual es suficiente para representar el fenómeno de manera similar a lo registrado por los investigadores italianos.

Sin embargo, para facilidad de la presente investigación se decide tomar como referencia el modelo experimental únicamente hasta el día 8, debido a que, al llegar a esta fecha, como se

evidencia más adelante, por causa de la instalación de una capa aislante en fibra de vidrio, esto genera un cambio en el comportamiento de los datos.

Además, se decidió registrar estos 17 puntos de fecha importantes para dividir la data, lo que se puede observar en la figura correspondiente, donde podemos ver la lista de fechas ingresadas en el simulador para su posterior análisis.

**Figura 8.** *Fechas de simulación definidas.*



\* - no keyword data exists on this date

#	Date & Time (min)
1	2000-01-01 (0.00)
2	2000-01-01.7187500000 (1035....
3	2000-01-01.7236111164 (1042....
4	2000-01-02.1986110210 (1726....
5	2000-01-02.2055554390 (1736....
6	2000-01-02.5111110210 (2176....
7	2000-01-02.5208332539 (2190....
8	2000-01-03.5708334446 (3702....
9	2000-01-03.5791666508 (3714....
10	2000-01-03.8743054867 (4139....
11	2000-01-03.8763887882 (4142....
12	2000-01-04.6062498093 (5193....
13	2000-01-04.6083331108 (5196....
14	2000-01-07.9104166031 (9951....
15	2000-01-07.9180555344 (9962....
16	2000-01-08.6395835876 (11001....
17	2000-01-09 (11520.00)

Esta data del artículo es de vital importancia dentro de la presente investigación, así que es digitalizada y con las fechas se crea un archivo histórico de extensión .fhf para poder próximamente buscar el ajuste por medio de la curva de temperatura vs. tiempo generada por la simulación y comparada con la investigación de Bientinesi, et al.

## **6. Algoritmo de integración del modelo de transferencia de calor por medio de radiación de ondas electromagnéticas al simulador comercial CMG-Stars**

Para reproducir este experimento a nivel numérico, es necesario crear una malla con las características y parámetros correspondientes al modelo experimental. Sin embargo, el software utilizado para la simulación no tiene la capacidad de implementar automáticamente el fenómeno de transferencia de calor por radiación entre celdas. Por lo tanto, es necesario realizar un ajuste adicional mediante instrucciones o keywords específicas para que el software reconozca y simule correctamente este fenómeno en la malla creada.

Para esto, se realiza una búsqueda en el manual de funcionamiento del software CMG-STARS por una alternativa para poder insertar las instrucciones necesarias para que el modelo sea capaz de representar dicho fenómeno.

### **6.1 Creación del Algoritmo de integración del modelo al simulador comercial CMG-Stars**

#### **6.1.1 Principio de funcionamiento del algoritmo**

La simulación del fenómeno de transferencia de calor de una celda a otra mediante radiación de ondas electromagnéticas es un proceso complejo que requiere la utilización de modelos matemáticos precisos. En el capítulo 3. se han listado varios modelos matemáticos que han sido estudiados y probados anteriormente en la literatura científica. Sin embargo, el modelo de Abernethy se ha demostrado ser el que mejor representa este fenómeno. Por ello, el algoritmo que se ha diseñado para este modelo experimental se basa en las investigaciones previas de Abernethy. Este modelo permite calcular la tasa de transferencia de calor en un ambiente de temperatura transitoria sin flujo de fluidos, lo cual es esencial para representar el fenómeno que se busca simular. Es importante mencionar que el uso de un modelo matemático preciso es esencial para garantizar la precisión y validez de los resultados obtenidos en la simulación.

Para que la interacción con el usuario sea lo más amigable posible se decide trabajar el algoritmo en programación por medio de Visual Basic con ayuda del software Microsoft Excel, que permite un lenguaje de programación de fácil entendimiento y desarrollo de diferentes variables, e interfaces sencillas de entender.

### **6.1.2 Función “HEATR”**

La keyword "HEATR" es una herramienta esencial para el modelado de transferencia de calor en el software CMG-STARS, según se menciona en su manual de usuario (CMG STARS USER GUIDE, 2016, p. 921). Esta instrucción permite la asignación de un aumento (+) o pérdida (-) de calor en una celda específica, basado en un cálculo bloque a bloque. En este sentido, es la principal herramienta utilizada para realizar el algoritmo en cuestión, ya que permite la representación precisa del fenómeno de transferencia de calor en el modelo experimental expuesto en la investigación de Bientinesi, et al.

Según el manual de CMG-STARS USERS GUIDE, para utilizar esta keyword de manera adecuada, es necesario seguir una estructura específica en cada línea de código. Un ejemplo de esta estructura se presenta como sigue: \*HEATR \*IJK 1 1 26:50 3459.89466505174, donde se coloca la keyword "HEATR" al inicio, seguida de las letras IJK, que hacen referencia a las coordenadas del sistema. A continuación, se insertan los números correspondientes en cada coordenada de la celda asignada, en este caso, se evidencia que la coordenada en dirección K es un rango de celdas que va desde la celda 26 a la 50. Finalmente, se inserta el valor de la tasa de calor que llega a cada una del rango de celdas.

Para poder generar las keywords para todo el modelo presentado por Bientinesi, et al., es necesario seguir un proceso detallado de creación de la herramienta por medio de macros de Excel, el cual nos permite crear las líneas de código con las keywords y así poderlas ingresar al modelo

en el software CMG-STARS de manera correcta y eficiente, dicho procedimiento se muestra a continuación.

## 6.2 Evaluación del algoritmo y generación de keywords

Para realizar el cálculo y generar los keywords necesarios para guiar el proceso en el simulador CMG- STARS, se tiene que hacer una serie de pasos que nos garantizan un correcto funcionamiento de la herramienta, descritas a continuación:

### 6.2.1 Datos necesarios para el funcionamiento del algoritmo

#### 6.2.1.1 Ingreso de propiedades físicas y termodinámicas del modelo experimental.

Para el correcto funcionamiento del algoritmo es necesario una serie de datos base del modelo experimental, los cuales fueron en su mayoría extraídos de la investigación de Bientinesi, et al., así como otros como los valores de alfa, que fueron ajustados para obtener un valor cercano a los generados por el modelo experimental del que se basa la presente investigación. Los datos ingresados en el algoritmo, se listan a continuación en la tabla 8.

**Tabla 8.** *Datos necesarios para el cálculo de la tasa de calor transmitida.*

Propiedad	Valor	Valor Roca 1	Valor Roca 2
Radio del modelo [cm]	63	-	-
Altura del modelo [cm]	75	-	-
Radio interno del modelo [cm]	-	6	12
Delta de radio (dr)	1	-	-
Espesor vertical de celda (dz)	1	-	-
Número de celdas en r	57	-	-
Número de celdas en z	-	50	1
Fecha inicial de simulación (DD MM AAAA)	1/1/2000	-	-
Delta de tiempo para calentamiento [horas]	1	-	-
Tiempo total de simulación [horas]	326.1	-	-
Alfa	-	0,017	0.0007

### 6.2.1.2 Datos de funcionamiento y entrega de potencia de la antena emisora. La

investigación de Bientinesi, et al. en su tabla 4 (Bientinesi, et al., 2013, p.9) hace relación de la bitácora del experimento realizado por ellos, y cómo fue el comportamiento de la potencia de la antena emisora de ondas electromagnéticas a través del tiempo, y que acciones tomaron para poder hacer los cambios en su potencia entregada y así mismo registrar como variaban los registros en su comportamiento, esta bitácora se muestra a continuación en la tabla 9.

**Tabla 9.** *Bitácora del experimento.*

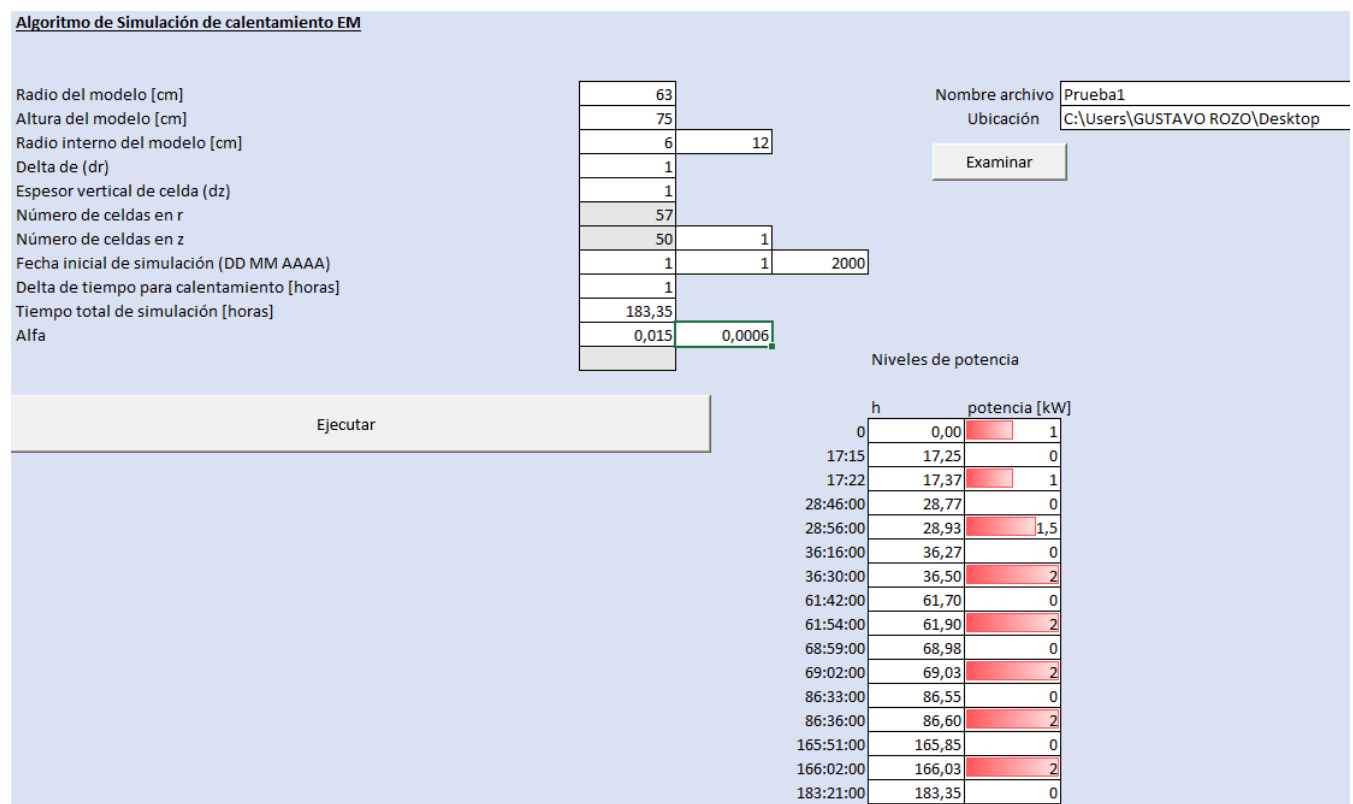
<b>Tiempo</b>	<b>Acción</b>
0	Magnetron encendido, potencia <b>1000W</b> , comienza a registrar data de T°
17 h 15 min	Magnetron apagado, medición con termocuplas (MTC1)
17 h 22 min	Magnetron encendido, potencia <b>1000W</b>
28 h 46 min	Magnetron apagado, medición con termocuplas (MTC2)
28 h 56 min	Magnetron encendido, potencia <b>1500W</b>
36 h 16 min	Magnetron apagado, medición con termocuplas (MTC3)
36 h 30 min	Magnetron encendido, potencia <b>2000W</b>
61 h 42 min	Magnetron apagado, medición con termocuplas (MTC4)
61 h 54 min	Magnetron encendido, potencia <b>2000W</b>
68 h 59 min	Magnetron apagado
69 h 02 min	Magnetron encendido, potencia <b>2000W</b>
86 h 33 min	Magnetron apagado
86 h 36 min	Magnetron encendido, potencia <b>2000W</b>
165 h 51 min	Magnetron apagado, medición con termocuplas (MTC5)
166 h 02 min	Magnetron encendido, potencia <b>2000W</b>
183 h 21 min	Magnetron apagado, paredes de acero y superficie cubiertas con aislamiento de fibra de vidrio
183 h 56 min	Magnetron encendido, potencia <b>2000W</b>
205 h 55 min	Magnetron apagado
205 h 57 min	Magnetron encendido, potencia <b>2000W</b>
232 h 29 min	Magnetron apagado
232 h 38 min	Magnetron encendido, potencia <b>2000W</b>
326 h 06 min	Magnetron apagado, medición con termocuplas (MTC6), retiro del aislamiento

Nota: Adaptado de Bientinesi, et al.

**6.2.2 Creación de la interfaz gráfica del algoritmo.**

Para facilitar el uso de la herramienta se creó la interfaz de manejo del algoritmo dividida en 3 partes importantes, la primera es el área de introducción de los datos, la segunda, el área de instrucciones de operación de la antena de emisión de ondas y por último una pequeña interfaz donde se visualiza y elige el directorio donde se creará el algoritmo de instrucciones para el modelo.

**Figura 9.** *Interfaz gráfica del algoritmo de simulación.*



**6.2.2.1 Área de introducción de los datos.** En el espacio ubicado en la parte superior izquierda del algoritmo, se encuentran listados los parámetro y características necesarias para el cálculo del calor entregado en cada celda y cada etapa de funcionamiento del experimento, en ella se evidencia la lista de los siguientes parámetros, que son listados en la tabla 7: radio del modelo (cm), altura del modelo (cm), radio interno del modelo (cm), delta de r (dr), espesor vertical de celda (dz), numero de celdas en r, numero de celdas en z, fecha inicial de simulación (DD MM AAA), delta de tiempo para calentamiento (horas), tiempo total de simulación (horas) y valor de alfa.

**Figura 10.** Área de introducción de datos del algoritmo listados en la tabla 8.

**Algoritmo de Simulación de calentamiento EM**

Radio del modelo [cm]	63		
Altura del modelo [cm]	75		
Radio interno del modelo [cm]	6	12	
Delta de (dr)	1		
Espesor vertical de celda (dz)	1		
Número de celdas en r	57		
Número de celdas en z	50	1	
Fecha inicial de simulación (DD MM AAAA)	1	1	2000
Delta de tiempo para calentamiento [horas]	1		
Tiempo total de simulación [horas]	326,1		
Alfa	0,035	0,001	

Ejecutar

**6.2.2.2 Área de representación de funcionamiento de antena generadora.** Luego de observar el registro de los datos de funcionamiento de la antena generadora y la bitácora representada en la tabla 8, podemos representar los mismos datos dentro de nuestro algoritmo, y así mismo poder reproducir y analizar paso a paso cada uno de los movimientos realizados a la operación del experimento, estos datos son entonces insertados en el algoritmo en Excel, y se representa de la siguiente manera, en la parte inferior derecha:

**Figura 11.** *Tabla de los datos expuestos en la tabla 9.*

Niveles de potencia			
	h	potencia [kW]	
0	0,00		1
17:15	17,25		0
17:22	17,37		1
28:46:00	28,77		0
28:56:00	28,93		1,5
36:16:00	36,27		0
36:30:00	36,50		2
61:42:00	61,70		0
61:54:00	61,90		2
68:59:00	68,98		0
69:02:00	69,03		2
86:33:00	86,55		0
86:36:00	86,60		2
165:51:00	165,85		0
166:02:00	166,03		2
183:21:00	183,35		0

**6.2.2.3 Área de elección del directorio de guardado.** En la parte superior derecha del algoritmo, ubicamos el espacio necesario para la ejecución del código que permite la creación del archivo de instrucciones para integrar al modelo, en un directorio a elección del usuario.

**Figura 12.** Área de elección de directorio de guardado del archivo .dat.

Nombre archivo	Prueba1
Ubicación	C:\Users\Usuario\Desktop
<input type="button" value="Examinar"/>	

### 6.2.3 Programación del algoritmo en lenguaje Visual Basic.

El algoritmo es diseñado y programado en la herramienta de Visual Basic presente en el software Excel, esta es una opción llamativa de realizar el código base, debido a su facilidad de entendimiento y fácil integración con modelos más básicos creados con hojas de cálculo en el software Excel.

Para la programación se comenzó con el nombramiento de las variables a utilizar en el algoritmo, todos los nombres son fácilmente reconocibles y relacionables con los datos, a continuación, se procede con la extracción de los parámetros antes mencionados que se encuentran en la hoja de cálculo llamada: “Datos Generales”. Posteriormente fue necesario crear el Schedule de potencia de entrega de la antena, esto con el fin de que, desde un principio, tomara en cuenta este registro.

Por último, la creación del archivo .dat se empieza a escribir con todas las indicaciones para que genere el ciclo de escritura de cada línea antecedida con la keyword \*HEATR, y de ahí en adelante que calcule los demás parámetros necesarios para que él mismo muestre las coordenadas y posteriormente calcule el calor entregado en esa celda por la onda electromagnética,

en la figura 13 se evidencia el código que fue realizado para la presente investigación donde se muestra parte de lo descrito anteriormente para su ejecución y posterior análisis.

**Figura 13.** Código fuente del algoritmo, programado en Visual Basic de Excel.

```

(General)
Do While (aux3 <> "")
texp(cont) = Worksheets(1).Cells(cont + 18, 6).Value
pexp(cont) = Worksheets(1).Cells(cont + 18, 7).Value
cont = cont + 1
aux3 = Worksheets(1).Cells(cont + 18, 6).Value
Loop

cont = cont - 1 ' cantidad total de tiempos con cambios en el magnetron

nombre = Worksheets("Datos generales").Cells(5, 8).Value
ruta = Worksheets("Datos generales").Cells(6, 8).Value

'Inicia la escritura del archivo
Set fs = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")

archivo = ruta & "\" & nombre & ".dat"
Set tx = fs.CreateTextFile(archivo, True)
Dim aux, aux2 As String 'auxiliares para convertir , en .

tt = tsim / dt 'cantidad total de pasos
Dim Qant As Double

For t = 1 To cont 'ciclo del tiempo
tim = texp(t)
'obtener el año, mes y día
yeara = ano + Int(tim / (365 * 24))
montha = mes + Int(tim / (24 * 30))
daya = dia + (tim / 24)
aux = Replace(daya, ",", ".")

tx.WriteLine "DATE " & yeara & " " & montha & " " & aux ' obtener la fecha en formato cmg

Qant = pexp(t)

For i = 1 To nr 'ciclo del espacio
'estimar r
r = radioint + dr * i

'insertar función que estima la cantidad de calor
If r > radio2 Then
yy = -alfa * (dr)
Else
yy = -alfa2 * (dr)
End If
Q = Qant * WorksheetFunction.Power(2.718, yy) 'esta función debe modificarse es un tentativo por ahora
Qabs = (Qant - Q) / nz 'Q absorbido en el delta
Qant = Q
Qabs = Qabs * 1000 * 60 'hacer el cambio de unidades lab: J/min
aux2 = Replace(Qabs, ",", ".")
tx.WriteLine "*HEATR *IJK " & i & " 1 " & nz2 & ":" & nz & " " & aux2

```

#### 6.2.4 Creación de archivo .dat

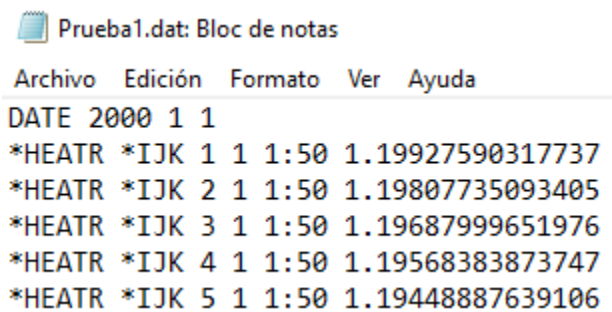
Ingresar los parámetros de cálculo es esencial para poder realizar el algoritmo de manera precisa. Estos parámetros incluyen variables como la temperatura, la conductividad térmica, el ángulo de incidencia, entre otros. Sin estos datos, el algoritmo no podría realizar los cálculos necesarios para representar el fenómeno de transferencia de calor.

Una vez que se tienen los parámetros de cálculo, el algoritmo se encarga de transformar estos datos en cálculos específicos para cada tasa de transferencia de calor. Estos cálculos son esenciales para poder representar el fenómeno de manera precisa y detallada.

El registro de los cálculos en un archivo .dat es importante para poder analizar y revisar los resultados obtenidos. Esta estructura particular del archivo permite una fácil lectura y análisis de los resultados, lo que es esencial para poder evaluar la precisión del algoritmo y detectar posibles errores.

El archivo .dat está estructurado de la siguiente manera:

**Figura 14.** Archivo .dat creado por el algoritmo.



```

Prueba1.dat: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
DATE 2000 1 1
*HEATR *IJK 1 1 1:50 1.19927590317737
*HEATR *IJK 2 1 1:50 1.19807735093405
*HEATR *IJK 3 1 1:50 1.19687999651976
*HEATR *IJK 4 1 1:50 1.19568383873747
*HEATR *IJK 5 1 1:50 1.19448887639106

```

En él podemos observar que la primera línea que genera es la fecha de ejecución de la simulación, y esta cambia periódicamente a medida que avanza el cálculo de las tasas de transferencia de calor.

En la segunda línea y de ahí en adelante observamos la keyword \*HEATR ya mencionada anteriormente que le indica al simulador la función de elevar o disminuir la tasa de transferencia

de calor en cierta celda de la malla de simulación, luego de la keyword \*HEATR, se muestra las siglas \*IJK, la cual le indica al simulador que lo que sigue a continuación son el sistema de coordenadas tridimensionales en dirección I (x), J (y) y K(z) del sistema y le indica en qué coordenada específicamente se ubica, el cual es el caso de los 3 siguientes grupos de números, el primero, corresponde a la coordenada en I, la segunda en J, y por último la coordenada en K, como se evidencia en la figura 14, la coordenada K es un rango de celdas que va desde la 1:50, esto quiere decir para mayor claridad, que el valor de tasa de transferencia de calor que se calcula en la primera línea, será en la coordenada IJK (1,1,1-50). Por último, el valor final es la tasa de calor transmitida en ese rango de celdas.

### **6.3 Ajuste de los valores de transferencia de calor al simulador CMG-STARS**

Este es uno de los principales objetivos de la presente investigación, lograr que el simulador CMG en su módulo STARS (que calcula fenómenos que involucren temperatura), logre representar el fenómeno de transferencia de calor por medio de las instrucciones generadas por el algoritmo anteriormente descrito.

Para realizar la integración, basta con dirigirse al archivo base de la simulación, en este caso, es llamado Modelo4.dat, y al abrir el archivo en el bloc de notas del ordenador, muestra toda su información para ser consultada o editada, es allí donde se ubica el espacio donde se encuentra la primera fecha de simulación, para el caso en particular de la actual investigación (DATE 2000 1 1), y justo debajo de esta línea las líneas generadas en el archivo creado al ejecutar el algoritmo son insertadas de manera que queden acopladas dentro del archivo base de simulación. Como se evidencia en la Figura 15, a continuación.

**Figura 15.** Archivo modificado del modelo de simulación en CMG-STARS.

```

*Modelo1.dat: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
INITIAL
VERTICAL OFF

INITREGION 1
DWOC 75
DGOC 0
PRES CON          103
SW CON           0.012
SO CON           0.312
MFRAC_OIL 'Soln_Gas' CON          0
MFRAC_OIL 'Dead_Oil' CON          1
REFDEPTH 0
REFPRES 101.3
NUMERICAL
RUN
DATE 2000 1 1
*HEATR *IJK 1 1 1:50 1.19927590317737
*HEATR *IJK 2 1 1:50 1.19807735093405
*HEATR *IJK 3 1 1:50 1.19687999651976
*HEATR *IJK 4 1 1:50 1.19568383873747
*HEATR *IJK 5 1 1:50 1.19448887639106
*HEATR *IJK 6 1 1:50 1.19329510828603

```

## 7. Análisis y resultados

Se puede afirmar que la etapa de realización de ajustes en un algoritmo es crucial para garantizar su correcto funcionamiento y obtención de resultados precisos. En este caso, la incorporación de las keywords necesarias para la simulación de transferencia de calor en el módulo STARS de CMG, es un paso importante para lograr un ajuste óptimo con los resultados obtenidos en la investigación de Bientinesi, et al.

La capacidad de llevar a cabo simulaciones precisas es esencial en cualquier investigación relacionada con la transferencia de calor. El proceso de ajuste permite adaptar el algoritmo a los

requisitos y características específicas de la investigación, garantizando una representación fiel y precisa del fenómeno de transferencia de calor.

Además, el registro de los resultados en un archivo .dat con una estructura previamente establecida, permite una gestión eficiente y organizada de los datos obtenidos, lo que contribuye a una evaluación rigurosa y detallada de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación.

### **7.1 Comportamiento de la temperatura en el modelo de Bientinesi, et al.**

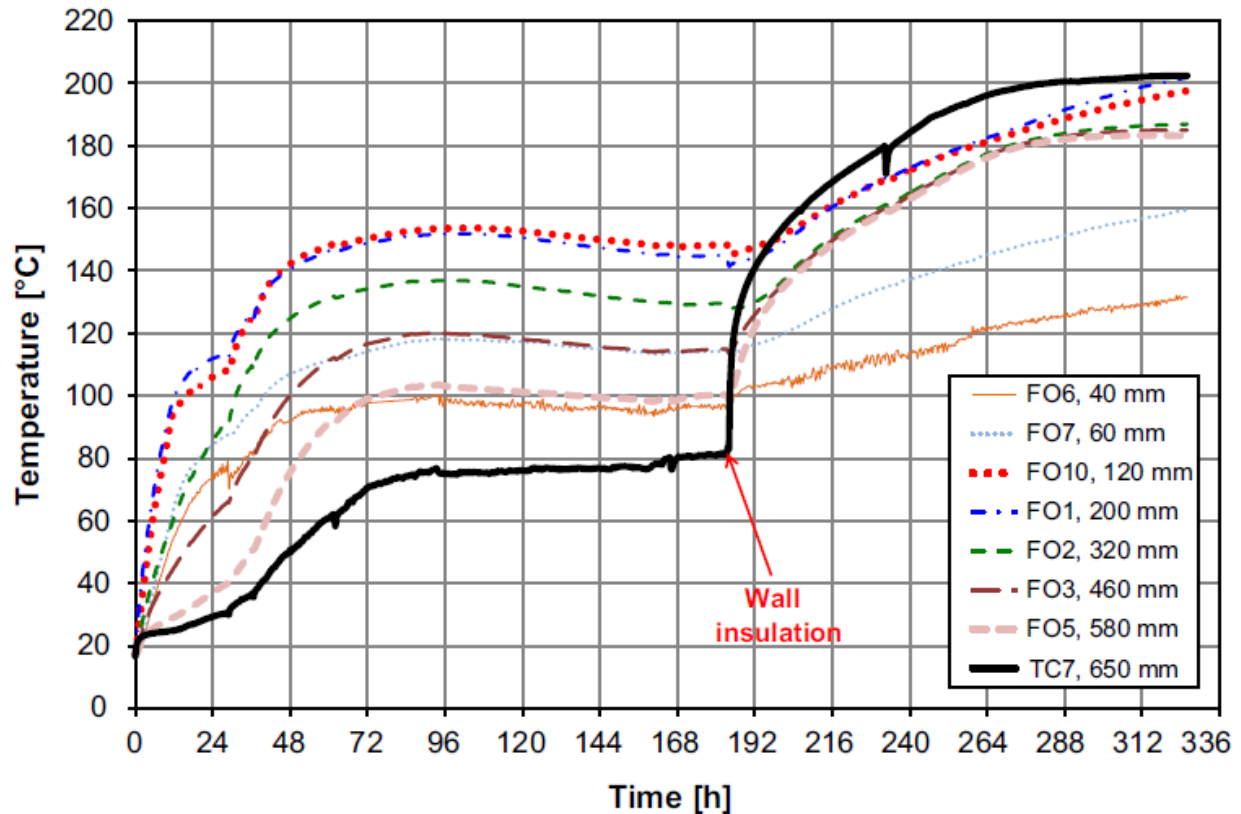
Es fundamental realizar un monitoreo preciso y exhaustivo de los fenómenos que se están investigando. En el caso de la investigación realizada por Bientinesi, et al, la detección de las temperaturas en diferentes lugares de la muestra de roca es un aspecto clave para poder establecer un modelo de comportamiento de la misma a través del tiempo. Para lograr esto, la investigación utilizó sensores térmicos o termocuplas ubicadas en distintos puntos, los cuales permitieron registrar con precisión la evolución de las temperaturas a lo largo del tiempo.

Este registro detallado de las temperaturas permitió a Bientinesi, et al. generar una curva modelo que representa el comportamiento de la temperatura en diferentes puntos de la muestra de roca que estaba siendo sometida a radiación electromagnética. Este modelo es una herramienta valiosa para comprender los fenómenos relacionados con la transferencia de calor en el sistema, y proporciona una base sólida para realizar futuras investigaciones en el campo.

Dichas curvas están expresadas en la investigación (Bientinesi, et al., 2013. p. 9), relacionada a continuación, en la figura 16, donde como se evidencia, muestra el comportamiento de la temperatura a través del tiempo en distintas posiciones donde se ubican las termocuplas, en este caso el sensor FO6, que esta ubicado a 40 mm de distancia de la antena, es decir en el espacio donde se encuentra el tight Shell, o la roca cuarzo que cubre los primeros 6 cm de espesor del experimento, el siguiente, el FO7 ubicado en el límite de los dos tipos de rocas a 60 mm de la

antena, FO10 a 120 mm, FO1 a 200 mm, FO2 a 320 mm, FO3 a 460 mm, FO5 a 580 mm y por último TC7 en el límite del arreglo experimental, en una de sus paredes.

**Figura 16.** Comportamiento de la temperatura en la investigación de Bientinesi, et al.



Estos datos de fechas fueron digitalizados y creados en un archivo .fhf, el cuál se va a utilizar más adelante para generar el ajuste y comparación con el modelo.

## 7.2 Resultados obtenidos por la simulación realizada en CMG STARS

Luego de realizar el modelo, es necesario analizar los resultados obtenidos en la lectura de las temperaturas y así poder realizar un modelo base de su comportamiento a través del tiempo, esto con el fin de adaptar en mayor parte la simulación en CMG con los datos obtenidos experimentalmente.

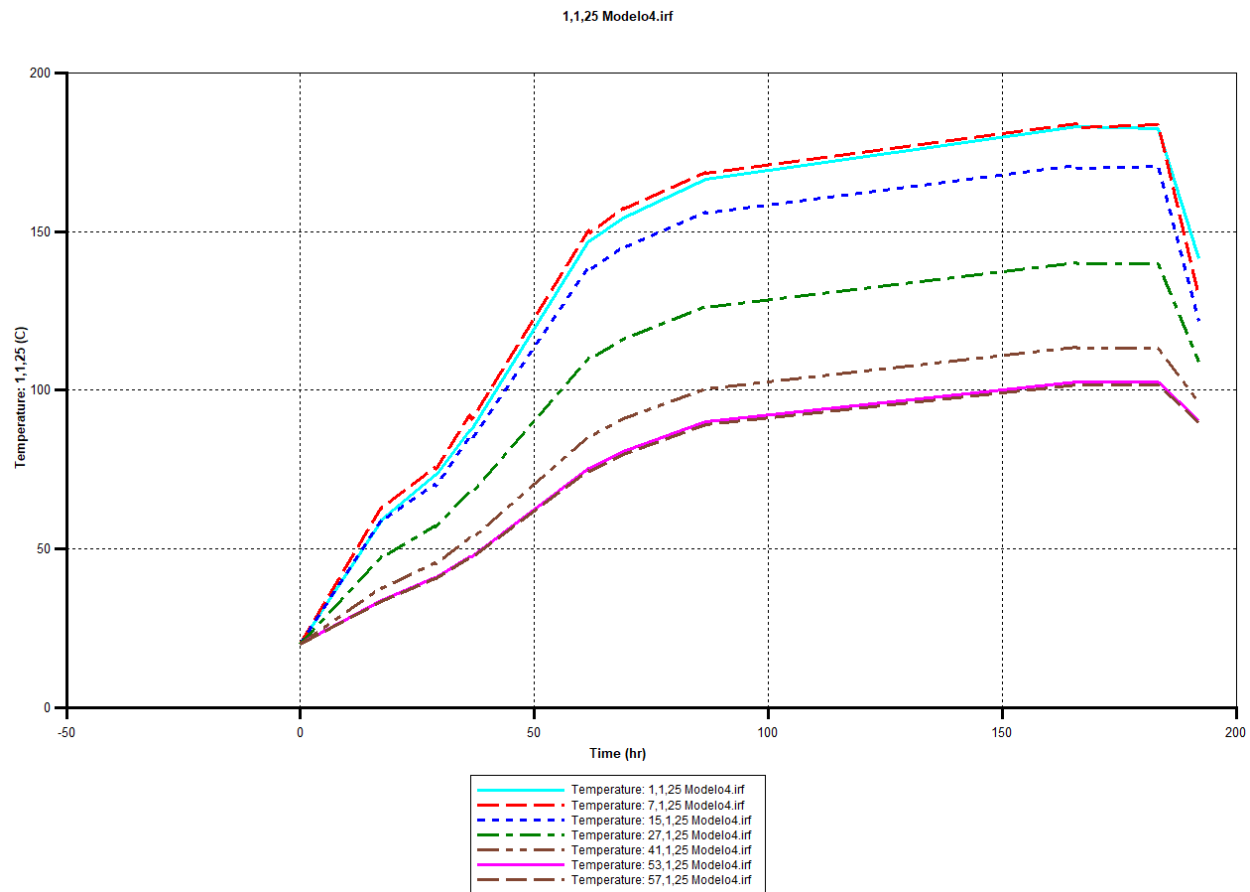
En este caso, el registro de temperaturas realizado por Bientinesi, et al., se convierte en la base para poder realizar un análisis exhaustivo y profundo de las lecturas obtenidas a través del

tiempo. Esto es fundamental para poder generar un modelo de comportamiento que sea una representación adecuada de las temperaturas a lo largo del tiempo en distintos lugares de la muestra.

El comportamiento de la temperatura a través del tiempo, es un elemento fundamental para poder adaptar la simulación en CMG con los datos obtenidos experimentalmente. Para lograr un modelo base preciso, es importante tener en cuenta el proceso de registro de las temperaturas y las tomas de datos realizadas en distintos momentos, y considerar su comportamiento durante todo el experimento. Con esta información, es posible realizar un modelo que se ajuste a la mayor parte a los resultados experimentales, lo que permitirá obtener una simulación mucho más precisa y fiel al experimento realizado.

Es importante destacar que la construcción de un modelo adecuado, permitirá obtener resultados más precisos y reales de la transferencia de calor en la muestra de roca, lo que, a su vez, permitirá mejorar los métodos térmicos de recobro utilizados en la industria y en la investigación.

En la figura 17, se presenta el comportamiento de la temperatura en los primeros 8 días del experimento, esto se planteó de esa forma, debido a que luego de las 183 horas con 21 minutos del experimento, se realiza la instalación de un aislante térmico de fibra de vidrio en la muestra experimental y de ahí en adelante los datos de temperatura, son más erráticos e imprecisos de simular debido a la falta de información para poder predecir su comportamiento.

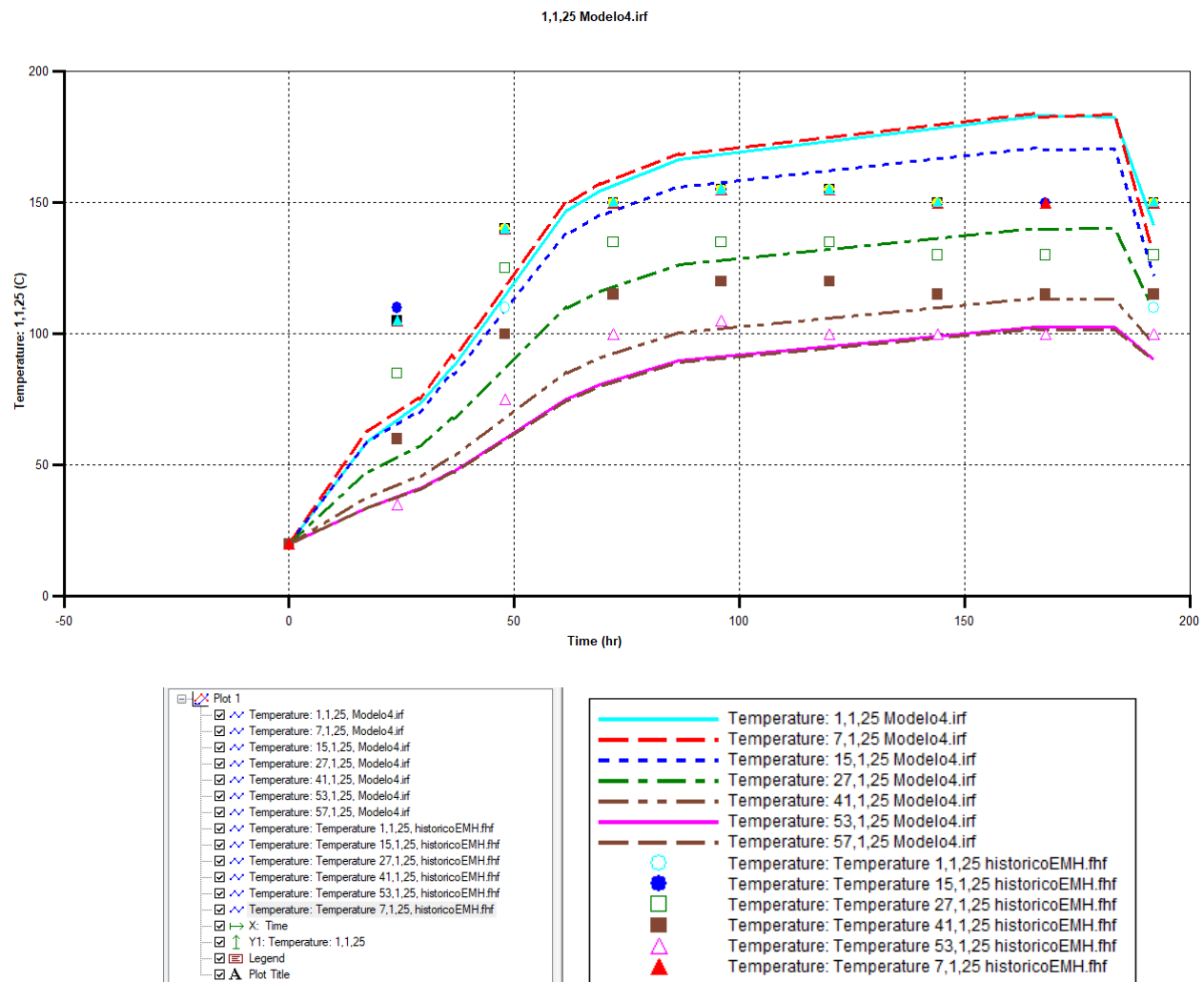
**Figura 17.** Comportamiento de la temperatura en la simulación.

### 7.3 Comparación de resultados de la simulación con la obtenida experimentalmente

En la figura 18, se presenta una plantilla de gráficas comparativas de los datos obtenidos experimentalmente y los generados en la simulación realizada en el módulo CMG-STARS. Esta comparación permitirá visualizar de manera clara la correlación entre ambos resultados, y así poder evaluar el grado de ajuste entre los datos experimentales y los generados en la simulación.

La plantilla de gráficas permite identificar de manera clara los puntos de coincidencia y divergencia entre los datos experimentales y los generados en la simulación, y así poder analizar en mayor profundidad el comportamiento de la transferencia de calor y su evolución a través del tiempo. Además, esta comparación es fundamental para la validación de los modelos matemáticos y la confiabilidad de la simulación realizada en CMG-STARS.

**Figura 18.** Gráfica comparativa de Bientinesi, et al., y la simulación en CMG.



### 7.4 Análisis de la comparación de los resultados

Es importante destacar los resultados obtenidos luego de realizar la simulación con el módulo STARS de CMG y compararlos con los documentados por Bientinesi, et al. A pesar de encontrar diferencias en algunos aspectos, es evidente que las curvas de temperatura, partiendo del mismo punto describen una trayectoria muy similar entre ellas. Sin embargo, es necesario mencionar los parámetros que pueden afectar el modelo y la interpretación de los resultados.

En primer lugar, es importante tener en cuenta las pérdidas de calor en el ambiente, ya que estos pueden afectar los resultados debido a la exposición de la muestra de roca al ambiente y la disipación de calor que se produce en el experimento. Además, el simulador no tiene la capacidad por sí solo de representar el fenómeno de transmisión de calor por radiación, y al realizar el algoritmo de ajuste de incremento de calor de cada celda manualmente, puede existir un porcentaje de error y desviación de los datos.

Sin embargo, aunque no hay exactitud en los resultados, se puede afirmar que el algoritmo propuesto permite representar de una manera cercana el fenómeno de entrega de calor en las celdas por medio de las ondas electromagnéticas en el simulador CMG – STARS. Es importante seguir investigando y mejorando los modelos simulados para lograr una mayor precisión y representación del comportamiento real de la transmisión de calor en yacimientos de crudo pesado y extrapesado.

## 8. Conclusiones

Se desarrolló un algoritmo que permite la simulación de un proceso de calentamiento electromagnético, técnica usada en recuperación de crudos pesados, usando un simulador de yacimientos comercial (CMG-STARS), el cual no está diseñado para este propósito.

Esto se logró realizando un estudio de los modelos matemáticos existentes para el modelado de procesos de calentamiento electromagnético por medio de revisión bibliográfica, donde luego de un análisis se escoge el modelo de Abernethy, debido a que este modelo tiene las características necesarias de modelo con temperatura transitoria y no flujo de fluidos que se buscaba representar.

Este modelo se logra implementar en un algoritmo matemático en lenguaje Visual Basic de Excel que permite predecir el incremento de la temperatura en el medio poroso como una

función del tiempo, el radio y otras variables del yacimiento. Luego, este algoritmo se logra ajustar para que permitiera la integración del modelo matemático a CMG-STARS simulando el calor adicional que se transmite hacia el medio poroso y los fluidos en la roca celda por celda.

Por último, se logra aplicar el algoritmo en CMG-STARS ajustando variables reconocidas por el software y permita simular el proceso de calentamiento electromagnético en base a una investigación experimental realizada por Bientinesi et al.

El modelo simulado reproduce la tendencia de las curvas de temperatura del modelo experimental y logra asemejarse en su comportamiento. Aunque hay pequeñas diferencias entre ellos, tanto la partida como la trayectoria de la curva son similares, Sin embargo, es necesario mencionar los factores que pueden afectar la interpretación de los resultados, como ejemplo encontramos las pérdidas de calor en el ambiente y el porcentaje de error generado por el simulador al no tener la capacidad de representar la transmisión de calor por radiación de manera exacta. Aún así, se permite afirmar que el algoritmo propuesto ajustado y anexado a CMG-STARS representa de manera cercana el fenómeno de entrega de calor en las celdas por medio de las ondas electromagnéticas.

## **9. Recomendaciones**

Con base en los resultados obtenidos y la comparación con los documentados por Bientinesi et al., se recomienda a los interesados en la presente investigación, escalar el problema a nivel de campo, a escala real de yacimiento.

Otra forma que se puede realizar una mejora, es buscar la forma de que el algoritmo se integre de una mejor forma al modelo de simulación, y representando mejor los resultados,

cambiando el valor de alfa en el algoritmo de acuerdo a variables de simulación como la saturación, entre otras.

### Referencias

- Abernethy, E. R. Production increase of heavy oils by electromagnetic heating. *Journal of Canadian Petroleum* (1976).
- Ayappa, K.G. (1997). *Reviews in Chemical Engineering*. 13:1-69.
- Bera, A., Babadagli, T. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: A review. *Elsevier* (2015).
- Bientinesi, M., et al., A radiofrequency/microwave heating method for thermal heavy oil recovery based on a novel tight-shell conceptual design. *Journal of Petroleum Science Engineering* (2013), <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.02.014>
- Bogdanov, I., et al., *Comparative Analysis of Electromagnetic Methods for Heavy Oil Recovery*. Society of Petroleum Engineers (2011).
- Bogdanov, I., et al., *Numerical Simulation of Electromagnetic Driven Heavy Oil Recovery*. Society of Petroleum Engineers (2012).
- Computer Modelling Group. (2016). *STARS User guide: Advanced processes and thermal reservoir simulator*. CMG
- Holguin, O. (2021). *Aplicación de ondas electromagnéticas para aumentar el factor de recobro en el campo tambococha*. Universidad Estatal Península de Santa Helena, La libertad, Ecuador.
- Mott, R., Untener, J. (2005). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. Pearson.
- Wang, Z., Gao, D. A Simulation Study on the High-Frequency Electromagnetic Heating Heavy Oil Reservoir and Analysis of Influencing Factors. *Arab J Sci Eng* 44, 10547–10559 (2019).