

CALENTAMIENTO DE YACIMIENTOS PETROLÍFEROS MEDIANTE CÁPSULAS DE REACCIÓN NUCLEAR

San Luís Tolentino, Simón Caraballo,  ngel Duarte y Jesús Mendoza

Departamento de Ingeniería Mecánica, UNEXPO Vice-Rectorado Puerto Ordaz, Estado Bolívar, Venezuela.

Recibido (14/10/15), aceptado (06/05/16).

Resumen: Las diferentes tecnologías de calentamiento aplicadas a pozos petrolíferos para extraer crudo extra pesado y pesado se realizan por métodos térmicos, los cuales son: inyección de vapor, agua caliente, combustión en sitio, calentamiento eléctrico, entre otros. Estos tipos de calentamiento se realizan con la finalidad de reducir la alta viscosidad del crudo y para aumentar su baja movilidad a la temperatura natural del medio poroso del yacimiento. En este trabajo se propone la implementación de una nueva alternativa de calentamiento de yacimientos petrolíferos de crudo extra pesado y pesado perteneciente a Venezuela, mediante cápsulas de reacción nuclear generadoras de calor. La geometría del diseño conceptual de la cápsula de reacción nuclear tiene las siguientes dimensiones: diámetro de 152,4 mm (6 pulg) y longitud de 3,048 m (120 pulg). Estas cápsulas son instaladas en posición vertical, y distribuidas mediante tres arreglos en el medio poroso de un yacimiento petrolífero de crudo extra pesado. Se realizaron tres simulaciones computacionales de análisis térmico en estado estacionario, con las siguientes consideraciones: 1) el fluido atrapado en el medio poroso se encuentra en reposo, 2) el crudo no se mueve por la tubería ranurada de extracción conocida como *rejilla* o *liner ranurado*. Los resultados presentan la distribución del gradiente de temperatura alrededor de las cápsulas y en todo el dominio del yacimiento sometido a estudio, para los tres arreglos de distribución de las cápsulas generadoras de calor.

Palabras Clave: Cápsula de reacción nuclear, Crudo extra pesado y pesado, Gradiente de temperatura, Simulación térmica.

HEATING OF OIL FIELDS BY NUCLEAR REACTION CAPSULES

Abstract: The different heating technologies applied to oil wells to extract extra heavy and heavy oil are carried out by thermal methods, which are: injection of steam, hot water, in-situ combustion, electric heating, among others. These types of heating are performed in order to reduce the high oil viscosity, and to increase the low mobility of oil at the natural temperature of the porous medium of the reservoir. In this work the implementation of a new alternative for heating of oil fields of heavy and extra heavy crude in Venezuela, by heat-generating nuclear reaction capsules is proposed. The geometry of the conceptual design of the nuclear reaction capsule has the following dimensions: diameter of 152.4 mm (6 in) and length of 3,048 m (120 in). These capsules are installed vertically, and distributed through three arrangements in porous media of an extra heavy crude oilfield. Three computer simulations of steady state thermal analysis were performed, with the following considerations: 1) the fluid trapped in the porous medium is at rest, 2) the crude does not move through the slotted extraction line known as "grid or slotted liner". The results show the distribution of the temperature gradient around the capsules and the entire domain of the oilfield under study, for the three arrangements of heat generating capsules.

Key words: Nuclear reaction capsule, extra heavy and heavy crude oil, temperature gradient, thermal simulation.

I. INTRODUCCIÓN

Los factores como la porosidad, la permeabilidad, y la presión, determinan cómo se comporta un yacimiento petrolífero, pero la densidad y la viscosidad del petróleo son las propiedades que dictan el enfoque del régimen de producción [1]. Un yacimiento de petróleo puede definirse como un volumen poroso que contiene agua, petróleo, y a veces una fase gaseosa [2]. La proporción volumétrica del petróleo puede alcanzar a veces el 40 % en el medio poroso

del yacimiento o roca almacén, el cual es heterogéneo, de origen sedimentario de tipo arenisca o caliza, donde el diámetro de su poro varía de acuerdo a la roca, que va de un tamaño microscópico de algunas fracciones de milímetro a algunos micrómetros [2]. Además, de manera independiente, cada medio poroso tiene sus propias características: a) la porosidad: porcentaje de volumen vacío, b) la permeabilidad: medida de la resistencia al movimiento de los fluidos, y c) la mojabilidad: tendencia de un fluido a adherirse a una superficie sólida [2].

Existen tres métodos clásicos de extracción del petróleo, los cuales son: a) recuperación primaria: que consiste en la extracción del petróleo por el gradiente de presión que existe entre el fondo del pozo que se encuentra a baja presión y la región del yacimiento a alta presión, b) recuperación secundaria: que emplea la inyección de agua y gas, y c) recuperación terciaria: que es conocida en la actualidad cómo recuperación mejorada del petróleo, donde se aplican procesos químicos, gases inertes, micro emulsiones y tecnologías térmicas [2, 3]. Entre los métodos térmicos de recuperación no convencional, se encuentran la inyección de vapor alternada y la continua, la combustión en sitio, la inyección de agua caliente, el calentamiento del fondo utilizando resistencia eléctrica, y el calentamiento electromagnético. Estos tipos de petróleo que tienen alta viscosidad, cuando se le aplica la tecnología térmica agregando calor al pozo, se logra reducir su viscosidad. La Figura 1 ilustra las fases de inyección cíclica de vapor [4], que consiste en inyectar al pozo un volumen preestablecido de vapor (barriles equivalentes de agua) por un tiempo establecido de una a tres semanas, luego, el pozo es cerrado, y se deja en fase de remojo (impregnación) de uno a cinco días, o incluso hasta dos semanas, para lograr un calentamiento uniforme alrededor del pozo, y en esta fase se logra disminuir la viscosidad del petróleo dentro de la zona de vapor, luego, se extrae el crudo por un periodo de cuatro a seis meses, hasta que deje de ser económicamente rentable la extracción del crudo [5].

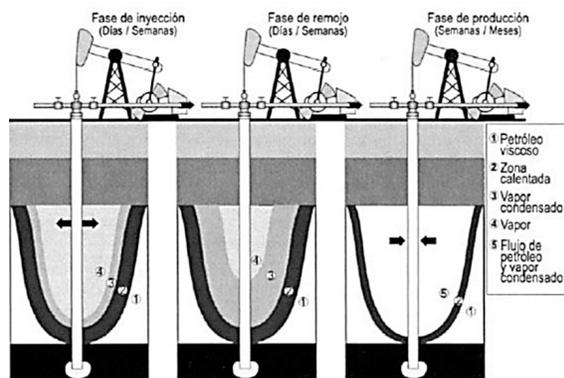


Figura 1. Fases de inyección cíclica de vapor [4].

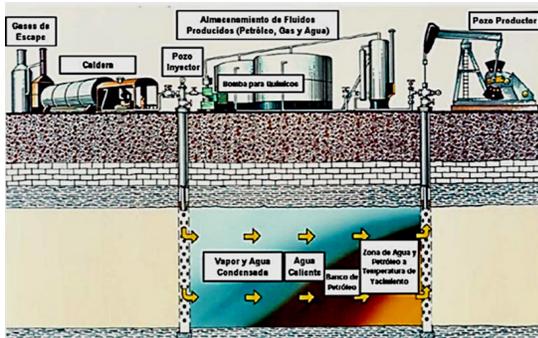


Figura 2. Inyección continua de vapor [6].

La Figura 2 muestra el proceso de la inyección continua de vapor. La inyección continua de vapor se define como un proceso de desplazamiento, y es más eficiente en la recuperación final de otros procesos con respecto a la estimulación con vapor. Además, presenta mejores perspectivas de recuperación entre valores de 40 % y 50 % [6].

La extracción de crudo pesado mediante cable calentador se ilustra en la Figura 3, en la misma se observa cómo el cable se encuentra posicionado. Es un método de recobro mejorado que consiste en introducir calor dentro del pozo sin fluidos de inyección [7]. El método de calentamiento eléctrico puede ser óhmico, por inducción, o resistivo.

En el método de calentamiento por inducción la corriente es inducida en la tubería principal (casing), el cual sirve como un elemento calentador, y el calor es generado dentro y fuera del pozo. En el método de calentamiento resistivo de la formación (medio poroso), la formación misma sirve como un resistor o conductor de electricidad, donde la corriente eléctrica es conducida dentro del reservorio por medio de la salinidad del agua. Además, esta técnica usa electrodos en el fondo de pozo, usualmente colocado dentro de un productor o un inyector. Otro método es por radio frecuencia y de microondas, usando energía de alta frecuencia para calentar el yacimiento [7, 8, 9, 13].

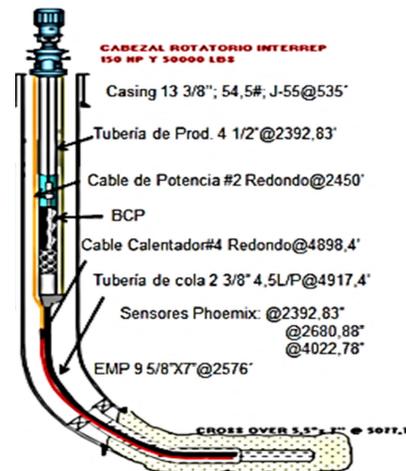


Figura 3. Cable calentador [7].

La Figura 4 ilustra el esquema de un calentador electromagnético en una de sus dos patentes desarrolladas por Haagensen D. [10, 11] para la recuperación de crudo a través de un calentamiento dieléctrico en yacimientos agotados.

El calentamiento electromagnético se basa en la fuerza ejercida por un campo eléctrico sobre las partículas dipolares y sobre los iones cargados. La transferencia

de energía durante el calentamiento de microondas ocurre por radiación, y luego por conducción, debido a la interacción directa entre las moléculas y el campo eléctrico presente. Para que el calentamiento sea elevado es necesario que las moléculas posean un momento dipolar alto [12]. En la industria petrolera para crudo pesado y extra pesado se aplica la energía electromagnética también conocida como corriente de alta frecuencia, en los rangos de radio frecuencia y microondas [13].

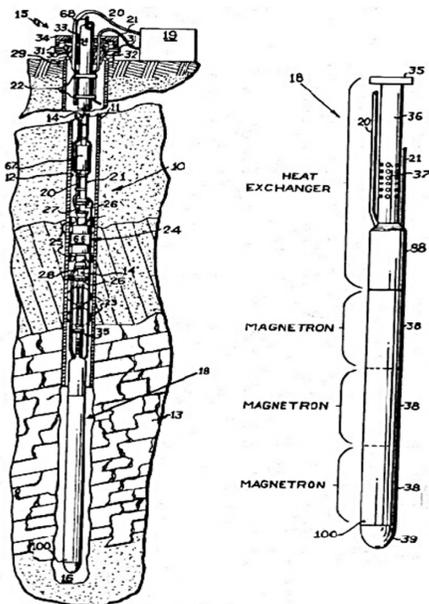


Figura 4. Calentador electromagnético [10, 11].

La combustión en sitio (*in situ*) y la inyección de aire permiten un incremento favorable en la cantidad de crudo recuperado de los reservorios. El proceso comprende la inyección de aire en la formación, la cual se realiza a través de los pozos inyector. El oxígeno del aire oxida al crudo generando calor, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos oxigenados y agua. Dependiendo de la reactividad de crudo y de las condiciones de formación, las reacciones de oxidación a baja temperatura pueden inducir a la combustión del crudo. También, la ignición puede provocarse introduciendo calor a través de un calentador [14, 15, 16].

Entre los yacimientos de crudo pesado y extra pesado pertenecientes a Venezuela, se destacan: El yacimiento Tía Juana que tiene crudo pesado con 15.5 °API y temperatura de 62.77 °C (145 °F); el yacimiento Cerro Negro que tiene crudo extra pesado con 7.7 °API y temperatura de 53.88 °C (129 °F); y el yacimiento Hamaca que tiene crudo extra pesado con 9.8 °API y temperatura de 58.33 °C (137 °F) [9, 17]. Para

estos tipos de crudo, primero se calienta el pozo a un valor estimado de 260 °C (500 °F), y luego se extrae. También, luego de ser calentado, a medida que se extrae se le sigue calentando. Cabe señalar, que por encima de la temperatura máxima límite se producen reacciones desfavorables del crudo confinado en el yacimiento [2]. En este trabajo se propone la implementación de una nueva alternativa de calentamiento de yacimientos petrolíferos de crudo pesado y extra pesado perteneciente a Venezuela, mediante cápsulas de reacción nuclear. Para lo cual, se instala los reactores nucleares en el medio poroso, generando calor a una temperatura estimada de 260 °C (500 °F), transfiriendo su calor hacia sus alrededores.

Para este tipo de calentamiento, no se tienen referencias de trabajos escritos y divulgadas en la literatura, por lo tanto es inédita esta nueva tecnología de calentamiento mediante cápsulas de reacción nuclear, propuesta en este trabajo por los autores.

En esta fase del trabajo, se realiza una simulación térmica en estado estacionario de un yacimiento petrolífero que tiene características semejantes al yacimiento Cerro Negro, empleando el software de simulación computacional COMSOL Multiphysics, que emplea el Método de Elementos Finitos (MEF).

Para la simulación computacional, no se considera el crudo en movimiento por la tubería de extracción ni el movimiento leve del fluido atrapado en el medio poroso. Por lo tanto, no se consideran los mecanismos de transferencia de calor por convección ni por radiación. Se considera todo el dominio en total y absoluto reposo como un solo cuerpo (medio poroso y fluido atrapado), y se usan los valores promedio de sus propiedades térmicas y físicas. Todo el dominio se simula térmicamente, mediante el mecanismo de transferencia de calor por conducción.

II. DESARROLLO

Cápsula de reacción nuclear

La cápsula de reacción nuclear en este trabajo es llamada también reactor nuclear. Los reactores nucleares que generan calor tienen diferentes estructuras internas de acuerdo a la potencia generada. La energía nuclear es la energía liberada durante la fusión o fisión de los núcleos atómicos [18].

La geometría del diseño conceptual de la cápsula (reactor nuclear) tiene un diámetro de 152,4 mm (6 pulg) y una longitud de 3,048 m (10 pies). La longitud lineal de la misma obedece a la necesidad de calentar los grandes espesores o capas del medio poroso en estudio, donde

se encuentra atrapado el crudo. El diámetro del reactor nuclear se establece en función del diámetro interno de la tubería por donde va ser instalada.

Aunque la parte interna del reactor nuclear como diseño conceptual no interviene en la simulación térmica en esta fase del trabajo, en la Figura 5 se muestran sus componentes internos. Está compuesta de combustible sólido, fluido, varilla de control móvil, entre otros [18], y alrededor de sus paredes externas contiene un aislante protector contra la radiación y contra la corrosión.

El reactor nuclear no requiere de energía eléctrica para la generación de calor. Sólo se requiere una cantidad mínima de electricidad para el funcionamiento de su sistema de control.

El desarrollo completo de la capsula generadora de calor requiere de múltiples disciplinas de la ingeniería, que involucra entre ellas: mecanismos de transferencia de calor, procesos de manufactura, estructura de materiales, física de la energía nuclear, instrumentación y control [18].

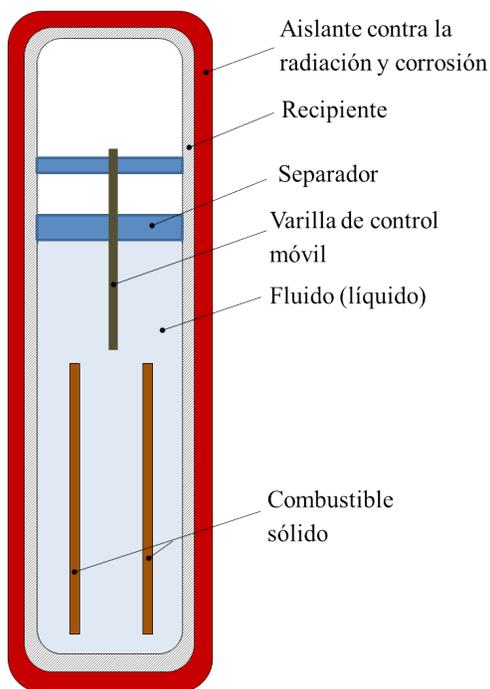


Figura 5. Capsula de reacción nuclear.

Para que la capsula sea instalada en un yacimiento petrolífero de crudo pesado y extra pesado se requiere de expertos en yacimientos. La Figura 6 ilustra la ubicación de dos capsulas en el medio poroso, así como la tubería de conexión y su sistema de control de temperatura. Cabe señalar, que de aquí en adelante, se hará mención sólo como capsula de reacción nuclear al referido reactor nuclear.

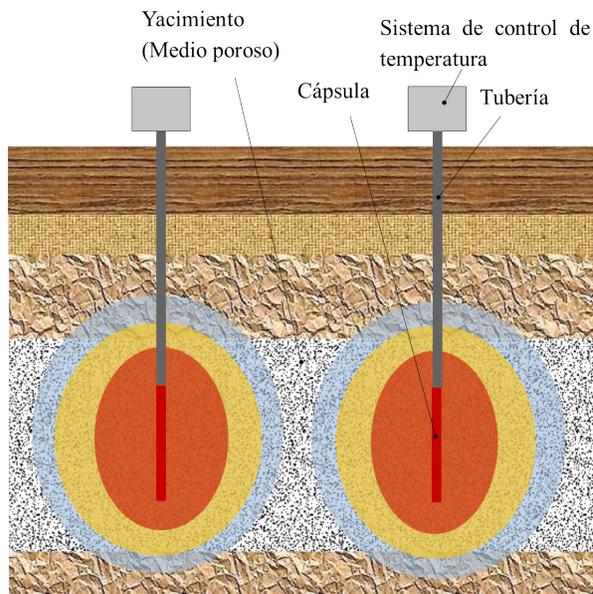


Figura 6. Calentamiento de yacimiento por medio de la capsula de reacción nuclear.

Dominio del yacimiento petrolífero

Las dimensiones externas básicas de la capsula de reacción nuclear se consideran como las de un cilindro sólido, con una longitud de 3,048 m (10 pies) y 152,4 mm (6 pulg) de diámetro. La temperatura considerada de la capsula es 260 °C (500 °F) en su estado inicial y final, es decir, es constante durante toda la etapa de calentamiento del yacimiento. La temperatura considerada inicial del yacimiento es 54,44 °C (130 °F); que es un valor similar a la del yacimiento de Cerro negro. La ubicación y distribución de las capsulas se ilustran más adelante en el procedimiento y en los resultados.

No se consideran en la simulación térmica las tuberías de los pozos de extracción ni las de instalación de las capsulas, ya que el dominio del yacimiento es mucho mayor con respecto a estas infraestructuras. Lo que se quiere obtener es el gradiente de temperatura en el yacimiento mediante la distribución y ubicación de las capsulas de reacción nuclear, ya que se considera que el crudo atrapado en el medio poroso está en absoluto reposo. Es decir, solamente se le está agregando calor al yacimiento, sin extracción del crudo.

La Figura 7 ilustra un modelo volumétrico idealizado de longitud total 926,592 m (3040 pies), ancho 310,896 m (1020 pies), y espesor 182,88 m (600 pies), que involucra al subsuelo y al medio poroso. En la parte media se encuentra la región del yacimiento donde está el crudo extra pesado atrapado, siendo su longitud 914,4 m (3000 pies), ancho 304,8 m (1000 pies), y espesor de 39,624 m (130 pies) [19].

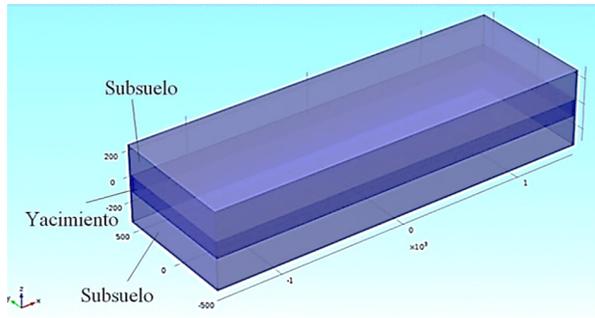


Figura 7. Geometría idealizada: subsuelo y yacimiento.

Por la simetría que tiene el modelo volumétrico idealizado, sólo se considera para la simulación térmica lo ilustrado en la Figura 8. Siendo este dominio computacional la octava parte del yacimiento y del subsuelo presentado en la Figura 7. Las dimensiones generales del dominio a simular en condición estacionaria (no transitorio) son: 460,248 m (1510 pies) de largo, 155,448 m (510 pies) de ancho, y 91,44 m (300 pies) de alto, siendo las del yacimiento 457,2 m (1500 pies) de largo, 152,4 m (500 pies) de ancho y 19,812 m (65 pies) de alto.

Se aplica solamente el mecanismo de la transferencia de calor por conducción para todo el dominio sometido a estudio. Para esto se utiliza un software de uso comercial, COMSOL Multiphysics, que emplea el Método de Elementos Finitos (MEF). Cabe resaltar que las dimensiones del yacimiento y propiedades involucradas han sido obtenidas de trabajos anteriores en el área de yacimientos petrolíferos, y no se menciona parte de la información de manera intencional en este trabajo.

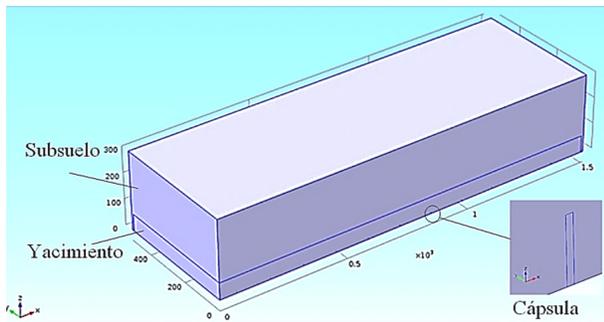


Figura 8. Dominio sometido a estudio.

De las consideraciones anteriores, para todo el dominio del yacimiento sometido a estudio que se ilustra en la Figura 8, la ecuación de la transferencia de calor por conducción [20], se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Y expresada como un vector en forma compacta:

$$\vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \in \Psi_{dom} \quad (2)$$

Donde, las propiedades termo-físicas del yacimiento se toman como sus valores promedios y son consideradas como las de un material isotrópico, siendo éstas:

$k=k(x,y,z,T)$: Conductividad térmica

$C_p=C_p(x,y,z,T)$: Calor específico

$\rho=\rho(x,y,z,T)$: Densidad

Para todo $\forall(x,y,z) \in \Psi_{dom}$, se tiene que:

En el estado inicial, la temperatura inicial es: $T(x,y,z)=54,44 \text{ }^\circ\text{C}$ (130 °F).

En el estado final, la temperatura final en las tres paredes del dominio es: $T(x,y,z)=54,44 \text{ }^\circ\text{C}$ (130 °F), mientras en el resto del dominio $T(x,y,z) \leq 260 \text{ }^\circ\text{C}$ (500 °F).

Para todo $\forall(x,y,z) \in$ simetría, se tiene que: $\dot{Q}=0$

Simetría plano yz , para $x=0$

$$k(x=0,y,z) \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Simetría plano xz , para $y=0$

$$k(x,y=0,z) \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Simetría plano xy , para $z=0$

$$k(x,y,z=0) \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Procedimiento

La Figura 9 ilustra el mallado del dominio por el Método de Elementos Finitos. Los elementos usados son tetraédricos de cuatro nodos; con tres grados de libertad en cada nodo, para un total de doce grados de libertad para todo el elemento finito [21].

Para este mallado, en la región del yacimiento en la parte de la simetría de mayor longitud en el eje x se colocaron 11 cápsulas de reacción nuclear a una distancia entre sí de 39,624 m (130 pies), los cuales, tienen una malla más refinada con respecto a las regiones del medio poroso y del subsuelo.

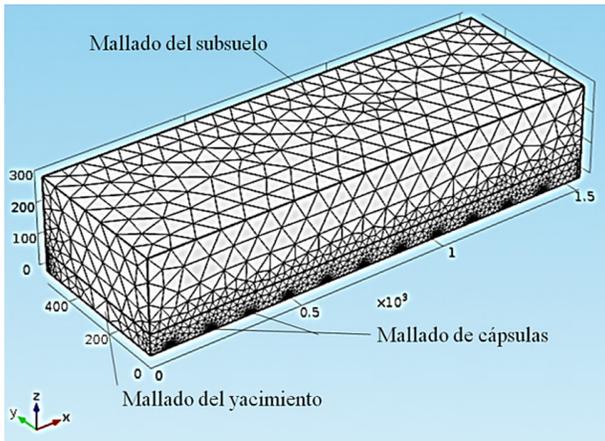


Figura 9. Mallado de todo el dominio.

Además, se ilustra en la Figura 10 un detalle de la malla de la cuarta parte de la cápsula incrustada en el yacimiento. Se obtuvo la convergencia numérica con respecto a la temperatura, refinando la malla correspondiente a la cápsula de reacción nuclear, así como las regiones del medio poroso y del subsuelo.

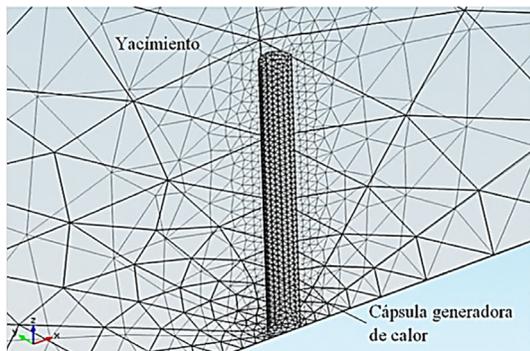


Figura 10. Detalle del mallado de la cápsula de reacción nuclear.

Resultados y discusión

La Figura 11 ilustra la ubicación y distribución a lo largo del eje x de 11 cápsulas de reacción nuclear, cada una a 39,624 m (130 pies) de distancia entre sí. Igualmente, se muestra el gradiente de temperatura en el dominio y sus valores en barra de colores, siendo el color rojo el de mayor temperatura y el azul de menor temperatura. Cabe destacar, que esta figura es obtenida a través de una proyección volumétrica luego que se realiza la simulación del dominio que se presenta en la Figura 9, lo cual ahorra recurso de tiempo de procesamiento y requiere menos potencia de la computadora. La unidad de la temperatura en las barras de colores y en las gráficas es grados Fahrenheit, la cual acostumbra emplear Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima (PDVSA) en este tipo de simulaciones.

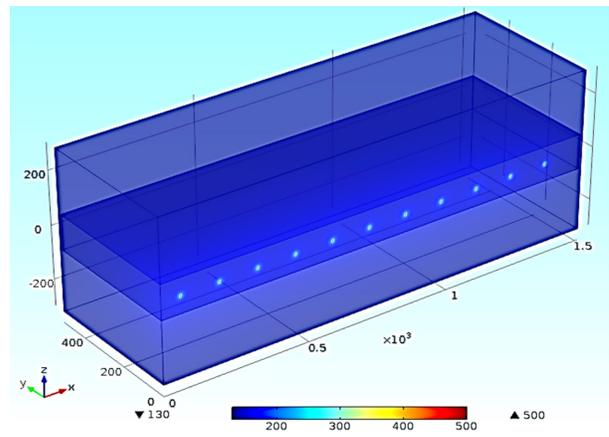


Figura 11. Gradiente de temperatura en el dominio, 11 cápsulas.

La Figura 12 ilustra una imagen ampliada a partir de la Figura 11 del gradiente de temperatura en el entorno de la cápsula.

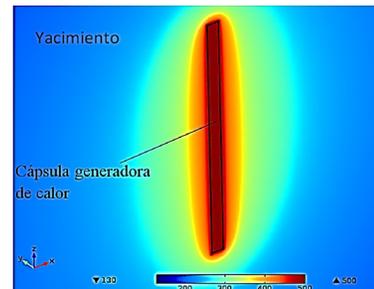


Figura 12. Gradiente de temperatura en el entorno de la cápsula.

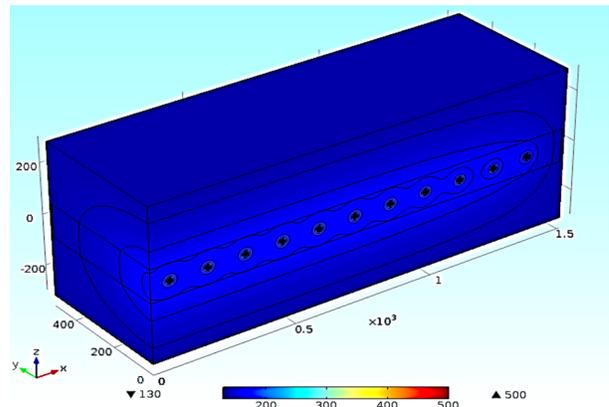


Figura 13. Isotermas alrededor de las 11 cápsulas en el yacimiento y del subsuelo.

La Figura 13 ilustra las isothermas alrededor de las cápsulas y del medio poroso y del subsuelo para una cuarta parte del modelo volumétrico idealizado.

La Figura 14 presenta tres perfiles de temperatura a lo largo del eje x, en el plano xz, siendo la temperatura máxima alrededor de la cápsula de 260 °C (500 °F), para z= 0 m (0 pies) la temperatura mínima es 73,88 °C

(165 °F) en la parte media entre dos cápsulas separadas a una distancia de 39,624 m (130 pies), para $z = 22,86$ m (65 pies) se tiene 71,11 °C (160 °F), y para $z = 39,624$ m (130 pies) es 65,55 °C (150 °F), aproximadamente. En el extremo derecho de los perfiles se produce una disminución del valor de la temperatura.

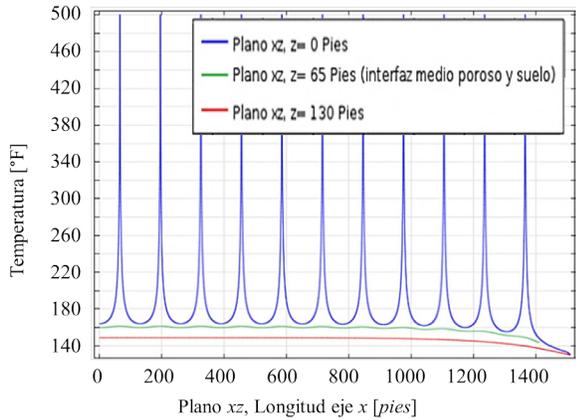


Figura 14. Perfil de temperatura plano xz, eje x, dominio del yacimiento y subsuelo.

De forma similar, en la Figura 15, se ilustra el comportamiento de cuatro perfiles de temperatura en el plano xy, siendo estos para $y = 0$ m (0 pies), $y = 22,86$ m (65 pies), $y = 39,624$ m (130 pies), y $y = 152,4$ m (500 pies).

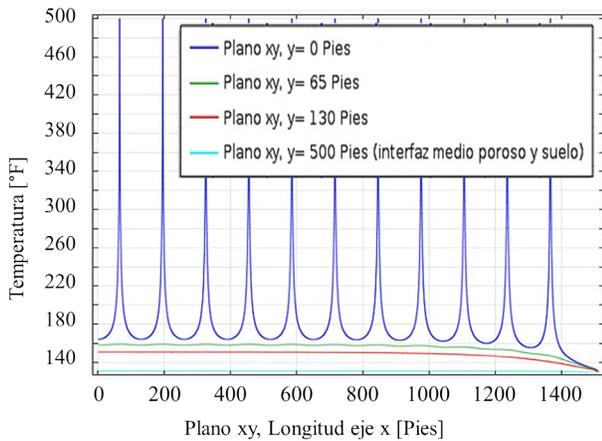


Figura 15. Perfil de temperatura plano xy, eje x, dominio del yacimiento.

En la Figura 16, en el eje y a partir de 15,24 m (50 pies) las curvas tienden a ser asintóticas para $z = 0$ m (0 pies), $z = 22,86$ m (65 pies), y $z = 39,624$ m (130 pies), respectivamente.

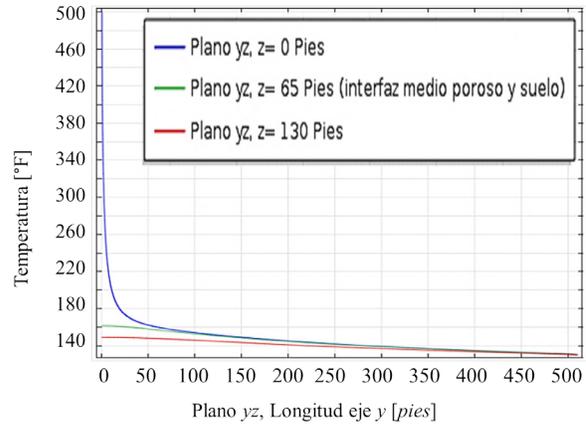


Figura 16. Perfil de temperatura plano yz, eje y, $x= 65$ pies, dominio del yacimiento y subsuelo.

La Figura 17 ilustra la ubicación y distribución a lo largo del eje x de 22 cápsulas de reacción nuclear cada una a 19,812 m (65 pies) de distancia entre sí, el gradiente de temperatura en el dominio. La unidad de la temperatura es en grados Fahrenheit.

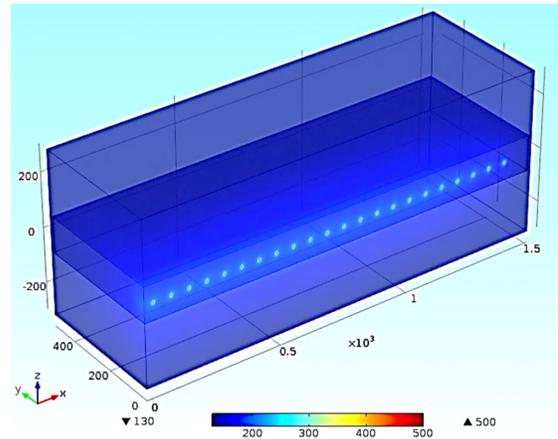


Figura 17. Gradiente de temperatura en el dominio, 22 cápsulas.

La Figura 18 presenta tres perfiles de temperatura a lo largo del eje x, en el plano xz, siendo la temperatura máxima alrededor de la cápsula de 260 °C (500 °F). Para $z = 0$ m (0 pies) la temperatura mínima es 94,44 °C (202 °F) en la parte media entre dos cápsulas separadas a una distancia de 19,812 m (65 pies), para $z = 19,812$ m (65 pies) se tiene 85 °C (185 °F), y para $z = 39,624$ m (130 pies) es 73,88 °C (165 °F), aproximadamente. En el extremo derecho de los perfiles se produce una disminución del valor de la temperatura. De forma similar en la Figura 19, se ilustra el comportamiento de cuatro perfiles de temperatura en el plano xy, para $y = 0$ m (0 pies), $y = 19,812$ m (65 pies), $y = 39,624$ m (130 pies), y $y = 152,4$ m (500 pies).

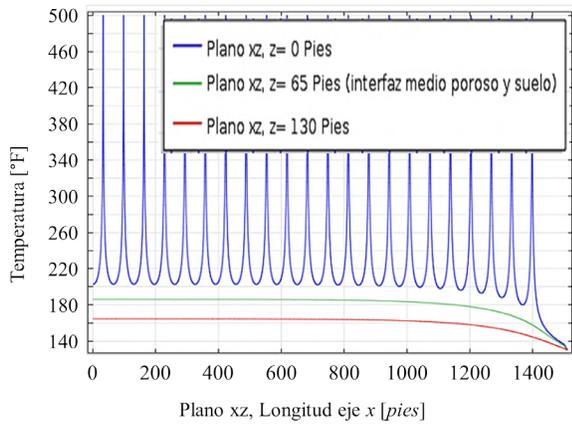


Figura 18. Perfil de temperatura plano xz, eje x, dominio del yacimiento y subsuelo.

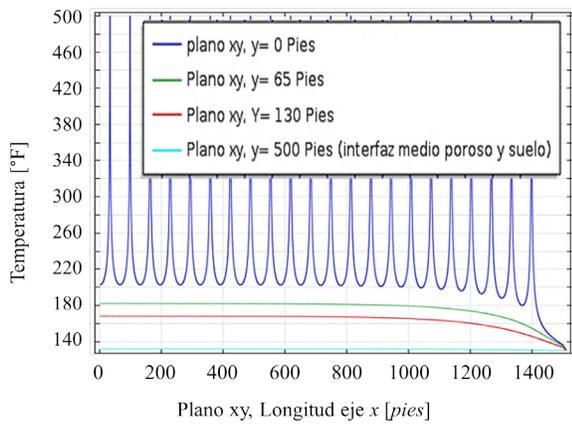


Figura 19. Perfil de temperatura plano xy, eje x, dominio del yacimiento.

En la Figura 20, en el eje y a partir de 7,62 m (25 pies) las curvas tienen una pendiente casi constante para $z = 0$ m (0 pies), $z = 19,812$ m (65 pies), y $z = 39,624$ m (130 pies), respectivamente. Para este arreglo de distribución lineal de las cápsulas de reacción nuclear, se tiene mayor incremento de temperatura en el dominio del medio poroso con respecto a la distribución lineal de 11 cápsulas. Cabe señalar, la evaluación térmica para 11 cápsulas tiene una distancia entre sí de 39,624 m (130 pies), y para la distribución de 22 cápsulas se tiene 19,812 m (65 pies), por lo tanto, debido a la cercanía entre cápsulas la acumulación de calor es mayor y requiere menor tiempo de calentamiento. El tiempo de calentamiento disminuye si las distancias entre cápsulas fueran más cortas, para esto se requiere un estudio de optimización, el cual, está fuera del alcance del presente trabajo.

Para obtener un incremento homogéneo de temperatura del dominio del medio poroso, se colocarían dos, tres o más hileras de cápsulas de reacción nuclear

siempre y cuando el yacimiento petrolífero lo amerite de acuerdo a las dimensiones volumétricas de crudo almacenado y la cantidad de pozos de extracción instalados, ya que esta nueva forma de calentamiento de yacimientos para crudos pesados y extra pesados logra disminuir la viscosidad de los mismos, y debido a la baja conductividad térmica del crudo con respecto a los materiales metálicos el calentamiento es demasiado lento así como su enfriamiento, por lo tanto requiere un mayor tiempo para ser calentado.

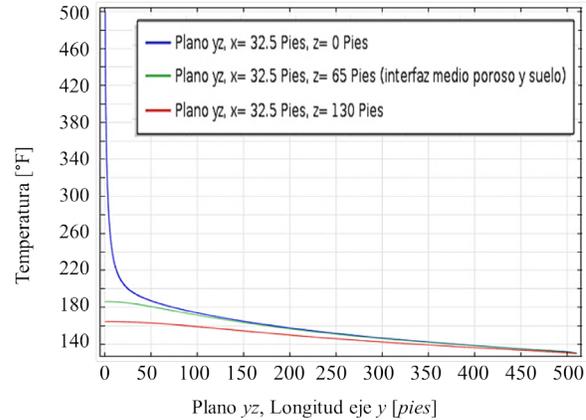


Figura 20. Perfil de temperatura plano yz, eje y, $x = 32,5$ pies, dominio del yacimiento y subsuelo.

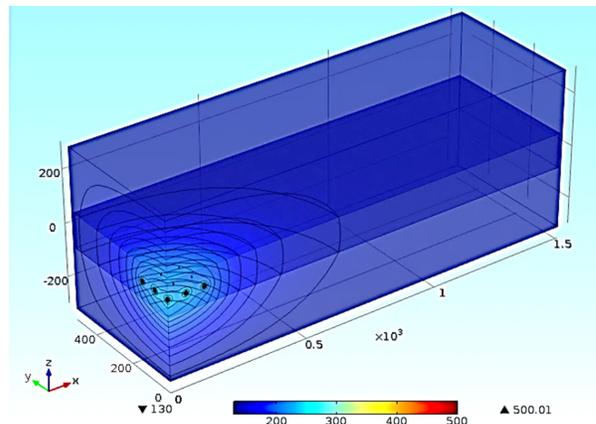


Figura 21. Gradiente de temperatura en el dominio, 9 cápsulas.

La Figura 21 ilustra una región del dominio simulado, en la cual se aprecia la distribución de 9 cápsulas de reacción nuclear con las mismas dimensiones del caso anterior, con una distancia entre sí equidistante de 19,812 m (65 pies).

Esta forma de distribución de las cápsulas es la más apropiada, si se considera que en el centro se encuentran varios pozos ubicados; además, el calentamiento del medio poroso es mayor en el plano xy y menor en los planos xz y yz . Además, se muestran las isothermas

alrededor de las cápsulas, en el yacimiento y en el subsuelo.

La Figura 22 muestra un detalle ampliado de la ubicación y distribución de las 9 cápsulas de reacción nuclear.

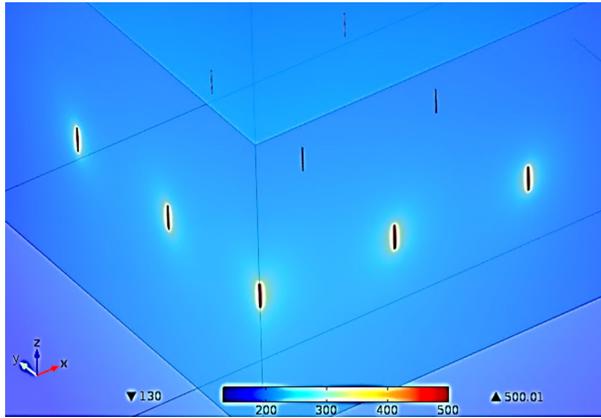


Figura 22. Detalle de la distribución de 9 cápsulas de reacción nuclear.

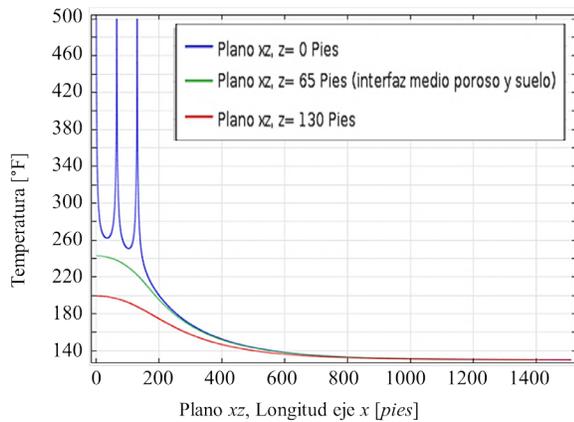


Figura 23. Perfil de temperatura plano xz, eje x, dominio del yacimiento y subsuelo.

La Figura 23 presenta tres perfiles de temperatura a lo largo del eje x, en el plano xz, siendo la temperatura máxima alrededor de la cápsula de 260 °C (500 °F), para $z = 0$ m (0 pies) la temperatura mínima aproximada de 126,66 °C (260 °F) en la parte media entre 2 cápsulas separadas a una distancia de 19,812 m (65 pies), para $z = 19,812$ m (65 pies) se tiene 115,55 °C (240 °F), y para $z = 39,624$ m (130 pies) se tiene 93,33 °C (200 °F), aproximadamente hasta 15,24 m (50 pies), y luego se aprecia una disminución de temperatura hasta los 152,4 m (500 pies) y a partir de allí se hace asintótica hacia el extremo derecho.

De forma similar en la Figura 24, se ilustra el comportamiento de cuatro perfiles de temperatura en el plano xy, para $y = 0$ m (0 pies), $y = 19,812$ m (65 pies), $y = 39,624$ m (130 pies), y $y = 152,4$ m (500 pies).

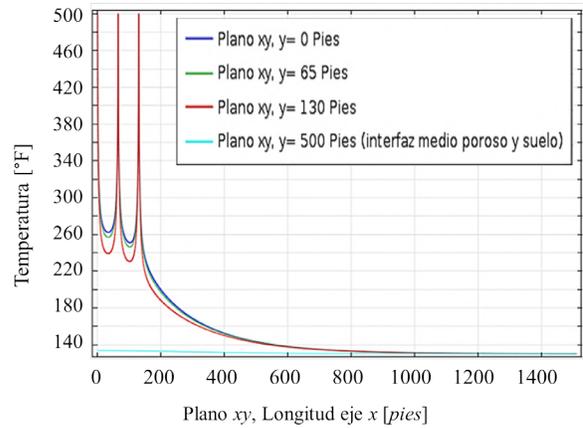


Figura 24. Perfil de temperatura plano xy, eje x, dominio del yacimiento.

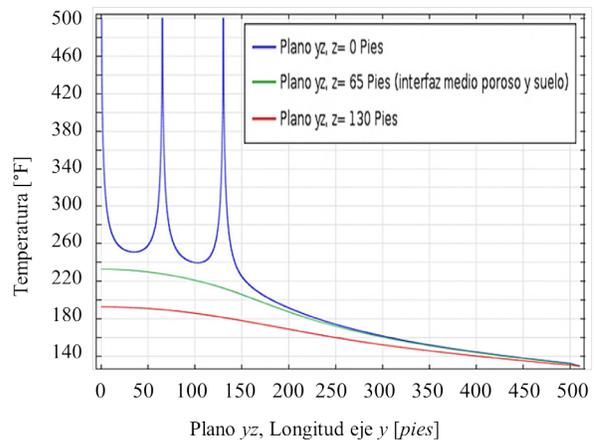


Figura 25. Perfil de temperatura plano yz, eje y, dominio del yacimiento y subsuelo.

En la Figura 25, se tiene un mayor incremento de temperatura hasta los 45,72 m (150 pies) en el eje y, luego la temperatura va disminuyendo. A partir de 121,92 m (400 pies) las curvas tienden a ser asintóticas para $z = 0$ m (0 pies), $z = 19,812$ m (65 pies), y $z = 39,624$ m (130 pies), respectivamente.

III. CONCLUSIONES

1. Para la distribución lineal en el eje x de 11 cápsulas de reacción nuclear, la temperatura en la interfaz del medio poroso y el subsuelo es 76,66 °C (160 °F) para $z = 19,812$ m (65 pies), y la temperatura mínima entre cápsulas es 73,88 °C (165 °F) siendo la separación de 39,624 m (130 pies) entre sí con respecto para $z = 0$ m (0 pies).

2. Para la distribución lineal en el eje x de 22 cápsulas de reacción nuclear, la temperatura en la interfaz del yacimiento y el subsuelo es 85 °C (185 °F) para $z = 19,812$ m (65 pies), y la temperatura mínima entre

cápsulas es 94,44 °C (202 °F) siendo la separación de 19,812 m (65 pies) entre sí con respecto para $z = 0$ m (0 pies).

3. La que produce mayor calentamiento del yacimiento es la distribución lineal de 22 cápsulas para el dominio simulado, sin embargo, para el total del dominio volumétrico idealizado el total será de 44 cápsulas.

4. Al comparar los perfiles de temperatura de las tres Figuras 23, 24 y 25, los mayores valores de temperatura se tienen dentro de un radio de 60,96 m (200 pies) en el espacio tridimensional, siendo la temperatura en ese radio aproximadamente de 87,77 °C (190 °F); con esta distribución de las cápsulas se ahorra recurso energético si sólo se requiere calentar un volumen determinado para una cierta cantidad de pozos en específico. Siendo necesario para esta simulación la cantidad de 25 cápsulas para todo el dominio volumétrico idealizado.

IV. REFERENCIAS

- [1] Curtis C., Kopper R., “Yacimientos de petróleo pesado”, Petrozuata Puerto la Cruz, Anzoátegui, Venezuela. Oilfield Review, Invierno de 2002/2003, pp. 32-55.
- [2] Salager J., “Recuperación mejorada del petróleo”, CUADERNO FIRP S357-C, Módulo de enseñanza en fenómenos interfaciales, ULA, Escuela de ingeniería Química, Mérida Venezuela, 2005, pp. 1-34.
- [3] PDVSA, “El pozo ilustrado”, FONCIED, Cuarta edición, Caracas Venezuela, 1998, p. 669.
- [4] Paris de Ferrer M., “Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos”, Segunda edición. Maracaibo, Ediciones Astro Data SA, Venezuela, 2002, p. 389.
- [5] Camacho J., Pérez A., “Estado del arte de las tecnologías de inyección cíclica de vapor”, Trabajo Especial de Grado, UCV, Venezuela, 2011, p. 207.
- [6] Alvarado D., Banzér C., “Recuperación térmica de petróleo”, Re-editado y corregido por Rincón M., Adafel C., Caracas Venezuela, 2002.
- [7] Romero I., “Evaluación técnica económica de la aplicación de la tecnología de cable calentador en el campo Zuata Principal”, Trabajo Especial de Grado, UCV, Venezuela, 2014, p. 169.
- [8] Gasbarri S., Díaz A., Guzmán M., “Evaluation of electrical Heating on recovery factor in extra heavy oil”, Paper SPE 149779, Alberta Canadá, 2009.
- [9] Somogyi G., “Estudio de diferentes esquemas de calentamiento dieléctrico para la recuperación mejorada de crudo”, Trabajo de Maestría, UCV, Venezuela, 2004, p. 281.
- [10] Haagensen B., “Oil well microwave tools”, Patente 3170159. 1965.
- [11] Haagensen B., “Oil recovery system and method”, Patente 4620593. 1986.
- [12] Medina B., Israel E., “Hidrodesulfuración de moléculas modelo empleando microondas como fuente de calentamiento”, Trabajo de Grado, USB, 1998.
- [13] Cazorla J., “Evaluación de la producción y el factor de recobro en yacimientos de crudo extra pesado a través de la aplicación de ondas electromagnéticas en pozos horizontales”, Trabajo Especial de Grado, UCV, 2011, p. 63.
- [14] National Petroleum Council. “Enhanced Oil Recovery”, National Petroleum Council Edition, USA, 1984, pp. 5-30.
- [15] Prats M., “Procesos térmicos de extracción de Petróleo”, Ediciones Técnicas Intevep, Venezuela, 1987.
- [16] Hernández N., “Evaluación experimental del proceso de combustión in situ empleando crudo de la faja petrolífera del Orinoco”, Trabajo de Grado, Especialista en gerencia integrada de yacimientos de hidrocarburos, UCV, Venezuela, 2003, p. 95.
- [17] Bernys J., “Capítulo 2: Yacimientos de hidrocarburos en Venezuela”, Venezuela, p. 47.
- [18] Ivanov N., “Multiphase flow dynamics, 5 nuclear thermal hydraulics”, Second edition, Berlin, Springer, 2011, p. 815.
- [19] Ramos D., “Análisis de sensibilidad de los parámetros que afectan el proceso de inyección alternada de vapor en pozos horizontales considerando un ciclo de inyección”, Trabajo Especial de Grado, UCV, Venezuela, 2003, p. 161.

[20] Incropera F., De Witt D., “Fundamentos de Transferencia de Calor”, Cuarta edición, México. Prentice Hall, 1999, p. 888.

[21] Tirupathi Ch., Ashok B., “Introducción al estudio del Elemento Finito en Ingeniería”, Segunda edición, México. Prentice Hall, 1999.

AGRADECIMIENTOS

- A Jehová nuestro Dios, mi fuente de sabiduría e inspiración.
- Al Departamento de Ingeniería Mecánica de la UNEXPO Puerto Ordaz, Venezuela.
- A la Dirección de Investigación y Postgrado de la UNEXPO Puerto Ordaz, Venezuela.

RESUMEN BIOGRÁFICO DE AUTORES



San Luís B. Tolentino Masgo. Ingeniero Mecánico, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica, egresado de la UNEXPO Vice-Rectorado Puerto Ordaz, Venezuela. Profesor Asistente adscrito al Departamento de Ingeniería Mecánica de la UNEXPO Puerto Ordaz. Sus trabajos de investigación aplicando códigos de simulación computacional (ANSYS y COMSOL), abarcan el área de: Transferencia de calor, Mecánica de fluidos, y Mecánica de materiales.

CIV: 175.375 (Colegio de Ingenieros de Venezuela)

Correo electrónico: stolentino@unexpo.edu.ve, sanluist@gmail.com



Simón A. Caraballo F. es Profesor en el Departamento de Ingeniería Mecánica en la UNEXPO Puerto Ordaz. Ingeniero Mecánico y Magister en Ingeniería Mecánica de la UNEXPO Puerto Ordaz. Ph.D. en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Sur de Florida. Sus intereses de investigación incluyen modelación, simulación y optimización por elementos finitos, análisis termo-mecánico de materiales funcionalmente graduados (FGMs), propiedades termo-elásticas de materiales no-homogéneos. Correo electrónico: scaraballo@unexpo.edu.ve.