



CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro

ISSN: 0122-5383

ctyf@ecopetrol.com.co

ECOPETROL S.A.

Colombia

Pérez Angulo, Julio-César; Cabarcas Simancas, Manuel-E.; Méndez, Adriana-Marcela
Principios fundamentales para el diseño conceptual de un modelo físico escalado para evaluar el
calentamiento eléctrico resistivo

CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro, vol. 3, núm. 2, diciembre, 2006, pp. 121-140

ECOPETROL S.A.

Bucaramanga, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46530209>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

PRINCIPIOS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DE UN MODELO FÍSICO ESCALADO PARA EVALUAR EL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

Julio-César Pérez Angulo^{1*}, Manuel-E. Cabarcas Simancas^{1*}, y Adriana-Marcela Méndez¹

¹Centro de Investigación del Gas y del Petróleo (CIGP), Universidad Industrial de Santander, UIS.
Bucaramanga - Colombia
e-mail: jperez@uis.edu.co e-mail: giehcig@uis.edu.co y cigp4@uis.edu.co

(Recibido 2 de Mayo 2006 ; Aceptado 28 de Noviembre 2006)

El objetivo de este artículo es presentar una breve descripción del procedimiento llevado a cabo para el escalamiento de un modelo físico que representará el comportamiento del campo La Hocha al ser sometido a un proceso de calentamiento eléctrico resistivo.

En la primera parte de este escrito se describen los principios básicos para el escalamiento físico. Seguidamente, se plantean las ecuaciones fundamentales para el proceso de calentamiento eléctrico resistivo, su transformación a la forma adimensional y los grupos de similitud que permitirán el escalamiento del modelo. El proceso de escalamiento toma forma en la sección final, en donde se definen las características del prototipo de campo, las fuerzas a reproducir en el modelo, la alternativa de escalamiento seleccionada, el cálculo de las propiedades del modelo y finalmente una validación del escalamiento en el simulador térmico STARS-CMG.

El diseño conceptual del modelo físico para el proceso de calentamiento eléctrico resistivo en el campo La Hocha (Hocol S.A.), requirió la combinación de alternativas de escalamiento tradicionales a baja presión y baja temperatura.

Palabras claves: escalamiento, modelos, análisis dimensional, recobro térmico.

* A quien debe ser enviada la correspondencia

This paper is aimed at presenting a short description of the procedure carried out for the scaling of a physical model representing the behavior of La Hocha field by subjecting it to a resistive electrical heating process.

The first part of this paper describes the basic principles for the physical upgrading, then the fundamental equations are proposed for the resistive electrical heating process, its transformation into the non-dimensional form and the similarity groups enabling the model scaling. The scaling process takes its form in the final section, where the field prototype characteristics, as well as the forces to be reproduced in the model, the chosen scaling option and calculations of the model properties are defined herein. A validation of the scaling in the thermal simulator (STARS-CMG) is also provided. The physical model conceptual design for the electrical resisting heating process in La Hocha field (HOCOL S.A.) required the combination of low pressure and low temperature traditional scaling options.

Keywords: *scale up, models, dimensional analysis, thermal recovery.*

NOMENCLATURA

a	Factor de escala
\hat{a}	Constante que depende del tipo de roca
A	A_{prod} = Área de producción o de inyección, [L ²]
b	Ancho de la abertura que simula el pozo, [L]
c_o	Calor específico de la fase aceite, [L ² T ⁻¹ Θ ⁻²]
c_r	Calor específico de la roca, [L ² T ⁻¹ Θ ⁻²]
c_{rad}	Calor específico de la roca adyacente, [L ² T ⁻¹ Θ ⁻²]
c_w	Calor específico de la fase agua, [L ² T ⁻¹ Θ ⁻²]
e_o	Energía interna de la fase aceite, [L ² Θ ⁻²]
e_w	Energía interna de la fase agua, [L ² Θ ⁻²]
e_{wfa}	Energía interna del agua en las formaciones Ady, [L ² Θ ⁻²]
F	Factor de formación para la zona de interés
$F_{arcilla}$	Factor de formación para los estratos adyacentes
\bar{g}	Gravedad, [LΘ ⁻²]
g_c	Constante gravitacional: 32,17 ft lb _m /lb _f s ²
h_o	Entalpía de la fase aceite, [L ² Θ ⁻²]
h_w	Entalpía del agua, [L ² Θ ⁻²]
I	Condición inicial,
I_{iny}	Corriente inyectada, [AΘ ⁻¹]
K	Permeabilidad absoluta, [L ²]
K_j	Permeabilidad efectiva de la fase j, [L ²]
K_o	Permeabilidad efectiva al aceite, [L ²]
K_w	Permeabilidad efectiva al agua, [L ²]
M_{fa}	Capacidad calorífica de la roca adyacente, [MΘL ² L ⁻¹ T ⁻¹]
M_{sal}	Masa de sal, [M]
M_σ	Capacidad calorífica, [MΘL ² L ⁻¹ T ⁻¹]
n	Constante para la ecuación de Archie

NOMENCLATURA

P	Presión, [ML ⁻¹ Θ ⁻²]
P_c	P_{cow} = Presión capilar, [ML ⁻¹ Θ ⁻²]
P_{iny}	Presión de inyección, [ML ⁻¹ Θ ⁻²]
P_o	Presión de la fase aceite, [ML ⁻¹ Θ ⁻²]
P_{oi}	Presión inicial de la fase aceite, [ML ⁻¹ Θ ⁻²]
P_{prod}	Presión de producción, [ML ⁻¹ Θ ⁻²]
P_w	Presión de la fase agua, [ML ⁻¹ Θ ⁻²]
P_{wf}	Presión de fondo fluyendo, [ML ⁻¹ Θ ⁻²]
P_{yac}	Presión del yacimiento, [ML ⁻¹ Θ ⁻²]
$P(r_e)$	Potencia disipada en el medio, [L ² MΘ ⁻³]
\bar{q}	Flujo de calor, [ML ² Θ ⁻³]
q_o	Tasa de producción de la fase aceite, [L ³ Θ ⁻¹]
q_w	Tasa de producción de la fase agua, [L ³ Θ ⁻¹]
Q	Tasa de entrada de energía por unidad de volumen
r_e	Espaciamiento entre pozos, [L]
R_f	Resistividad de la formación, [ML ³ A ⁻² Θ ⁻³]
R_{fa}	Resistividad de las formaciones adyacentes, [ML ³ A ⁻² Θ ⁻³]
r_w	Radio del pozo, [L]
R_{w1}	R_w = Resistividad del agua a condiciones estandar, [ML ³ A ⁻² Θ ⁻³]
R_{w2}	Resistividad del agua a la temperatura de interés, [ML ³ A ⁻² Θ ⁻³]
s_o	Saturación de la fase aceite
s_{oi}	Saturación de aceite inicial
s_{or}	Saturación de aceite residual
s_w	Saturación de agua
s_{wfa}	Saturación de agua en las formaciones adyacentes
s_{wi}	Saturación de agua inicial
s_{wirr}	Saturación de agua irreducible

NOMENCLATURA

t	Tiempo, [Θ]
T	Temperatura, [T]
T_b	Temperatura normal de ebullición, [T]
T_c	Temperatura de la roca adyacente, [T]
T_i	Temperatura inicial, [T]
$T_{m\acute{a}x}$	Máxima temperatura alcanzada, [T]
T_{min}	Temperatura inicial del yacimiento, [T]
T_1	Temperatura a condiciones estandar, [T]
T_2	Temperatura de interés, [T]
$u_{ex} u_{ey} u_{ez}$	Flujo de energía en la dirección x, y ó z, [$M\Theta^{-3}$]
\bar{v}_j	Velocidad Darcy de la fase j, [$L\Theta^{-1}$]
\bar{v}_o	Velocidad de la fase aceite, [$L\Theta^{-1}$]
\bar{v}_{on}	Velocidad de la fase aceite en la dirección normal al flujo, [$L\Theta^{-1}$]
$v_{o,x}, v_{o,y}, v_{o,z}$	Velocidad de la fase aceite en la dirección x, y ó z, [$L\Theta^{-1}$]
\bar{v}_w	Velocidad de la fase agua, [$L\Theta^{-1}$]
\bar{v}_{wn}	Velocidad de la fase agua en la dirección normal al flujo, [$L\Theta^{-1}$]
$V_{w,x}, v_{w,y}, v_{w,z}$	Velocidad de la fase agua en la dirección x, y ó z, [$L\Theta^{-1}$]
$W_{salmuera}$	Tasa de inyección de salmuera, [$L^3\Theta^{-1}$]
x	L, Dimensión del modelo y del prototipo en x, [L]
y	W, Dimensión del modelo y del prototipo en y, [L]
z	H, Espesor del modelo y del prototipo, [L]

LETRAS GRIEGAS

α	Ángulo de buzamiento
γ_o	Gravedad específica del hidrocarburo
ΔP	Diferencial de presión, [ML ⁻¹ Θ ⁻²]
ΔT	Delta de temperatura, [T]
ε	Distancia medida desde el plano de referencia, [L]
σ_w	Conductividad térmica del agua, [ML T ⁻¹ Θ ⁻³]
ϕ	Porosidad
ϕ_{fa}	$\phi_{arcilla}$ = Porosidad de la formación adyacente
Φ_e	Potencial eléctrico, [ML ² A ⁻¹ Θ ⁻³]
λ_f	Conductividad térmica de la formación, [MLΘ ⁻³ T ⁻¹]
λ_{fa}	Conductividad térmica formaciones adyacentes, [MLΘ ⁻³ T ⁻¹]
μ_j	Viscosidad de la fase j, [ML ⁻¹ Θ ⁻¹]
μ_o	Viscosidad del aceite, [ML ⁻¹ Θ ⁻¹]
μ_w	Viscosidad del agua, [ML ⁻¹ Θ ⁻¹]
ρ_j	Densidad de la fase j, [ML ⁻³]
ρ_o	Densidad del aceite, [ML ⁻³]
ρ_r	Densidad de la roca, [ML ⁻³]
ρ_{rad}	Densidad de la roca adyacente, [ML ⁻³]
ρ_w	Densidad del agua, [ML ⁻³]
ρ_{wfa}	Densidad del agua en las formaciones adyacentes, [ML ⁻³]
ρ_e	Energía interna por unidad de volumen, [ML ⁻¹ Θ ⁻²]
σ_o	Conductividad térmica del aceite, [ML T ⁻¹ Θ ⁻³]
ω	Factor de cementación
∇	Operador divergencia
∇_n	Operador divergencia en la dirección normal
∇P	Operador gradiente de presión

INTRODUCCIÓN

La amplia demanda de crudo y la notable disminución de las reservas convencionales, han generado un gran interés en la búsqueda y explotación de yacimientos de crudo pesado. Sin embargo, aunque estas fuentes alternas sean atractivas y numerosas en estos tiempos (600-1000 millones de barriles de reservas en Colombia, según reporte dado por la Asociación Colombiana del Petróleo el 28 de Junio de 2005), su recuperación se hace cada día más compleja debido a la alta viscosidad que presentan los fluidos. Diversos métodos de recobro han sido desarrollados entre los que se destacan los procesos térmicos de vapor, combustión “in-situ” y el calentamiento eléctrico. Para implementar alguno de estos métodos es necesario realizar las siguientes validaciones: 1) Estudio experimental de laboratorio, 2) Simulación numérica y 3) Pilotos de campo. El estudio experimental incluye el diseño y ejecución de pruebas en un simulador físico escalado, el cual tiene la ventaja de capturar fenómenos físicos que puedan estar ocurriendo en un proceso en particular. En el ámbito del diseño de modelos escalados para procesos de calentamiento eléctrico Harvey, Arnold, and El-Feky (1979), Yuan *et al.* (2004), y Chakma and Jha (1992) han sido los exponentes más representativos de este método. Harvey *et al.* (1979), desarrollaron su estudio para investigar la viabilidad de utilizar corriente eléctrica en el calentamiento de ciertas zonas de un yacimiento no accesibles por inyección de fluidos. Yuan *et al.* (2004) y colaboradores realizaron pruebas en modelos escalados permitiendo demostrar que la inyección de salmuera alrededor de los pozos mejora significativamente la distribución de la corriente en profundidad. Por su parte, Chakma and Jha (1992), estudiaron la posibilidad de emplear calentamiento electromagnético en formaciones de poco espesor en las que los métodos térmicos convencionales son antieconómicos. Un estudio completo encaminado a desarrollar el proceso de calentamiento eléctrico resistivo en el campo La Hocha está siendo desarrollado en conjunto por Colciencias, el Centro de Investigación del Gas y del Petróleo y la empresa Hocol S.A. El campo La Hocha, localizado en el municipio de Tesalia en el departamento del Huila - Colombia, cuya formación productora corresponde a las arenas de la formación Monserrate a 3 800 pies de profundidad, presenta un crudo de 17 °API apto para la aplicación de este método.

El objetivo primordial de este artículo es establecer una serie de parámetros de escalamiento que permitan plantear un modelo físico parcialmente escalado con el cual se pueda evaluar la eficiencia del calentamiento eléctrico resistivo sobre la productividad del yacimiento.

GENERALIDADES SOBRE EL ESCALAMIENTO FÍSICO

En estudios de viabilidad para la implementación de procesos de recobro mejorado es común desarrollar pruebas de laboratorio en patrones a pequeña escala conocidos como modelos físicos, los cuales basados en principios de similaridad son representativos del comportamiento del yacimiento.

Las dos técnicas universalmente empleadas y validadas por Leverett, Lewis, and True (1942), Rapoport (1955), Stegemeier, Laumbach, and Volek (1980) y Farouq (1993a, 1993b) para formular modelos físicos escalados son:

- **Análisis Dimensional:** Su formulación está basada en el Teorema π de Buckingham y en la determinación de las variables relevantes al problema en estudio.
- **Análisis Inspeccional:** Su formulación está basada en las ecuaciones básicas, condiciones iniciales y de frontera que describen el fenómeno.

Para Croes and Schwarz (1955), Stegemeier *et al.* (1980), y Wygal (1963), las principales limitantes de los modelos físicos están ligadas a la escasa disponibilidad de materiales y fluidos con propiedades físicas que puedan satisfacer todos los requerimientos de escalamiento, así como la imposibilidad para reproducir exactamente la porosidad y el comportamiento de las curvas de permeabilidades relativas y presiones capilares del prototipo de campo.

METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL DESARROLLO DEL MODELO

La metodología aplicada para obtener los grupos de escalamiento y el dimensionamiento del modelo es la siguiente:

1. Planteamiento de todas las ecuaciones que describen el comportamiento del yacimiento y el proceso de calentamiento eléctrico resistivo.
2. Transformación de todas las ecuaciones a la forma adimensional y obtención de los grupos de similitud.
3. Análisis detallado de todas las fuerzas actuando en el yacimiento y los fenómenos a estudiar.
4. De acuerdo con los mecanismos más importantes a representar en el modelo, seleccionar la mejor aproximación de escalamiento y sus suposiciones inherentes.
5. Relajar variables en los grupos de similitud para obtener los grupos de escalamiento.
6. Finalmente escalar las principales propiedades del modelo.

Tabla 1. Ecuaciones para la descripción del proceso de calentamiento eléctrico resistivo

TIPO DE ECUACIÓN	ECUACIÓN	TIPO DE ECUACIÓN	ECUACIÓN
Flujo de Fluidos	$\vec{v}_j = -\left(\frac{K_j}{\mu_j}\right) (\nabla P - \rho_j \vec{g})$	Relación Constitutiva	$S_o + S_w = 1$
Balace de Energía	$\frac{\partial u_{ex}}{\partial x} + \frac{\partial u_{ey}}{\partial y} + \frac{\partial u_{ez}}{\partial z} = -\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} - \frac{1}{R_f} \left[\left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial z}\right)^2 \right]$ $u_{ex} = -\lambda_f \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) + (v_{o,x} \rho_o h_o + v_{w,x} \rho_w h_w)$ $u_{ey} = -\lambda_f \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right) + (v_{o,y} \rho_o h_o + v_{w,y} \rho_w h_w)$ $u_{ez} = -\lambda_f \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \left(v_{o,z} \rho_o \left(h_o + \frac{\bar{g}\bar{\epsilon}}{g_c} \right) + v_{w,z} \rho_w \left(h_w + \frac{\bar{g}\bar{\epsilon}}{g_c} \right) \right)$	Relación Constitutiva	$P_c = P_w - P$
Balace de Masa	$\phi \frac{\partial(\rho_f S_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{v}_f) = 0$	Relación Constitutiva	$\phi = \phi(x, y, z)$
Relación Constitutiva	$\bar{g} = cte$	Relación Constitutiva	$\rho_f = \rho_f(p_f, T)$
Relación Constitutiva	$\mu_f = \mu_f(p_f, T)$	Relación Constitutiva	$K_f = K_f(K, S_o, S_w)$
Relación Constitutiva	$\lambda_f = \lambda_f(T)$	Relación Constitutiva	$\rho_r = cte$
Condición Inicial	$S_f(i, x, y, z) = S_{fi}(x, y, z)$	Condición Inicial	$T(i, x, y, z) = T_i$
Condición Inicial	$P_f(i, x, y, z) = P_{fi}(x, y, z)$	Condición Limite	$\lambda_f \nabla_n T = \lambda_{Fa} \nabla_n T_c$
Condición Limite	$\rho_f \vec{v}_{fn} = -\rho_f \frac{K_f}{\mu_f} (\nabla_n P_f + \rho_f \bar{g} \nabla_n z) = 0$	Condición Limite	$\nabla_n P_f = -\rho_f \bar{g} \nabla_n z$
Condición Limite	$\lambda_f \nabla_n T = 0_c \quad \vec{q} = 0$	Condición Limite	$P_o = P_{prod}$
Condición Limite	$\int_{Ainy} \rho_w \left(\frac{K_w}{\mu_w}\right) (\nabla P_w + \rho_w \bar{g} \nabla z) * dA = W_{salmuera}$	Condición Limite	$P_w = P_{prod} + P_{cow}$

Planteamiento de las ecuaciones que describen el fenómeno

La Tabla 1 lista las ecuaciones básicas para un proceso de calentamiento eléctrico resistivo, de acuerdo con las suposiciones, y la metodología de adimensionamiento planteada por Stegemeier *et al.* (1980). El modelo matemático que relaciona la tasa de calentamiento eléctrico es tomado del balance de energía planteado por Hiebert, Vermeulen, Chute, and Capjack (1986).

Transformación de las ecuaciones a la forma adimensional

Para derivar los grupos de similitud por análisis inspeccional, las ecuaciones diferenciales parciales, las condiciones iniciales y de frontera y las relaciones constitutivas y restrictivas deben expresarse en términos de variables adimensionales. Cada variable o parámetro que hace parte de las ecuaciones pueden llevarse a la forma adimensional dividiéndolos por una cantidad característica de referencia (Stegemeier *et al.*, 1980). Tomando como ejemplo la ecuación de balance de masa, el proceso de adimensionamiento es el siguiente:

Ecuación de balance de masa

$$\phi \frac{\partial(\rho_f S_f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f v_{fx})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_f v_{fy})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_f v_{fz})}{\partial z} = 0$$

Adimensionamiento de la ecuación

$$\phi_D \phi_R \frac{\partial(\rho_{oD} \rho_{oR} S_{oRD})}{\partial(t_D t_R)} + \frac{\partial(\rho_{oD} \rho_{oR} v_{oxD})}{\partial(x_D x_R)} + \frac{\partial(\rho_{oD} \rho_{oR} v_{oyD})}{\partial(y_D y_R)} + \frac{\partial(\rho_{oD} \rho_{oR} v_{ozD})}{\partial(z_D z_R)} = 0$$

Agrupación de términos de referencia en grupos

$$\left(\frac{\phi_R \rho_{oR} S_{oR}}{t_R} \right) \phi_D \frac{\partial(\rho_{oD} S_{oMD})}{\partial t_D} + \left(\frac{\rho_{oR} v_{oxR}}{x_R} \right) \frac{\partial(\rho_{oD} v_{oxD})}{\partial x_D} + \dots$$

División de toda la ecuación por alguno de los coeficientes

$$\phi_D \frac{\partial(\rho_{oD} S_{oMD})}{\partial t_D} + \left(\frac{v_{oxR} t_R}{\phi_R S_{oR} x_R} \right) \frac{\partial(\rho_{oD} v_{oxD})}{\partial x_D} + \dots$$

Grupo de similitud obtenido

Aplicando este concepto a cada una de las ecuaciones presentadas en la Tabla 1 se obtiene el grupo final de parámetros de similitud para un proceso de calentamiento eléctrico resistivo. Este conjunto de grupos generado es presentado en la Tabla 2. En este punto del proceso es preciso resaltar la importancia de los grupos XVI y XXV obtenidos en esta investigación a partir de los balances de energía, los cuales relacionan la tensión aplicada con las propiedades térmicas y eléctricas del medio. Los grupos restantes, son los grupos tradicionalmente obtenidos por Stegemeier *et al.* (1980) para aplicaciones de inyección de vapor. El grado de consistencia de los dos grupos generados en relación con los balances de masa y energía planteados, serán validados mediante simulación numérica comparando el comportamiento del modelo y del prototipo para un tiempo de calentamiento y producción específico.

Análisis detallado de todas las fuerzas actuando en el yacimiento

Este análisis se realiza con el objetivo de escalar mediante los grupos obtenidos el efecto de las fuerzas más representativas en el yacimiento. La Tabla 3 es el resultado del análisis de fuerzas realizado al campo La Hocha dentro del marco de esta investigación. La determinación de las fuerzas influyentes esta soportada en información de yacimientos y de producción suministrada por Hocol S.A.

Selección de la aproximación de escalamiento y sus suposiciones inherentes

La Tabla 4, planteada inicialmente por Kimber, Farouq, and Puttagunta (1988) en sus investigaciones, presenta las aproximaciones más aplicadas en el diseño de modelos escalados. La aproximación I descrita en la Tabla 4, fue seleccionada como la mejor forma de abordar el escalamiento.

APLICACIÓN DEL ESCALAMIENTO FÍSICO EN EL CAMPO LA HOCHA

Mediante la construcción de un modelo físico representativo del yacimiento, se busca validar a escala de laboratorio, las diversas hipótesis relacionadas con el efecto del calentamiento eléctrico sobre parámetros como la viscosidad del crudo, distribución de la temperatura y la producción.

Tabla 2. Parámetros de similitud obtenidos por análisis inspeccional

PARÁMETRO	GRUPO	PARÁMETRO	GRUPO	PARÁMETRO	GRUPO	PARÁMETRO	GRUPO
I	$\begin{pmatrix} x_R \\ y_R \end{pmatrix}$	VIII	$\left(\frac{1}{S_{or}} \right)$	XV	$\left(\frac{\rho_{jR} \phi_{jR} S_{jR} \epsilon_{jR} x_{jR}^2}{\lambda_{jR} \Delta T_{jR} t_{jR}} \right)$	XXII	$\left(\frac{\phi_{jR} M_{jR} x_{jR}^2}{\lambda_{jR} t_{jR}} \right)$
II	$\begin{pmatrix} x_R \\ z_R \end{pmatrix}$	IX	$\left(\frac{A_{er}}{R_R x_R^3 I_{impR}} \right)$	XVI	$\left(\frac{\Phi_{er}^2}{R_{jR} \lambda_{jR} \Delta T_{jR}} \right)$	XXIII	$\left(\frac{\rho_{w/jR} \phi_{jR} S_{w/jR} \epsilon_{w/jR} x_{w/jR}^2}{\lambda_{jR} \Delta T_{jR} t_{jR}} \right)$
III	$\left(\frac{\mu_{jR} \phi_{jR} S_{jR} x_{jR}^2}{K_{jR} P_{jR} t_{jR}} \right)$	X	$\left(\frac{\mu_{jR} \lambda_{jR} T_{jR}}{K_{jR} P_{jR} \rho_{jR} h_{jR}} \right)$	XVII	$\left(\frac{M_{jR} x_{jR}^2}{\lambda_{jR} t_{jR}} \right)$	XXIV	$\left(\frac{T_{jR}}{T_R} \right)$
IV	$\left(\frac{x_R \rho_{jR} S_{jR} \text{sen}(\alpha_R)}{P_R} \right)$	XI	$\left(\frac{\rho_{jR} \tilde{\alpha}_{jR} K_{jR} P_{jR} x_{jR}}{g_{z-R} \lambda_{jR} T_{jR} \mu_{jR}} \right)$	XVIII	$\left(\frac{S_{or}}{S_{or}} \right)$	XXV	$\left(\frac{\Phi_{er}^2}{R_{jR} \lambda_{jR} \Delta T_{jR}} \right)$
V	$\left(\frac{P_{or}}{P_{cr}} \right)$	XII	$\left(\frac{M_{(G)R} x^2}{\lambda_{jR} t_{jR}} \right)$	XIX	$\left(\frac{S_{wir}}{S_{wir}} \right)$	XXVI	$\left(\frac{W_{salmeriaR} \mu_{wR}}{\rho_{wR} K_R P_{zR}} \right)$
VI	$\left(\frac{P_{wR}}{P_{cR}} \right)$	XIII	$\left(\frac{\phi_{jR} M_{(G)R} x^2}{\lambda_{jR} t_{jR}} \right)$	XX	$\left(\frac{T_{jR}}{T_R} \right)$	XXVIII	$\left(\frac{P_{prodR}}{P_{wR}} \right)$
VII	$\left(\frac{S_{wR}}{S_{or}} \right)$	XIV	$\left(\frac{P_{prodR}}{P_{or}} \right)$	XXI	$\left(\frac{P_{or}}{P_{or}} \right)$	XXVIII	$\left(\frac{P_{covR}}{P_{wR}} \right)$

*Donde el subíndice R denota cantidad de referencia

PRINCIPIOS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DE UN MODELO FÍSICO

Tabla 3. Fuerzas y aspectos a considerar en el comportamiento del yacimiento en La Hocha

PREGUNTAS	FUERZAS VISCOSAS	FUERZAS CAPILARES	FUERZAS GRAVITACIONALES
¿Qué son?	Son aquellas que se reflejan en la magnitud de la caída de presión como resultado del flujo de fluidos a través del medio poroso (Paris, 1991).	*Tensión interfacial: es la energía que existe entre la superficie de dos fluidos inmiscibles (Paris, 1991). *Humectabilidad: habilidad de un fluido para adherirse preferencialmente a una superficie sólida en presencia de otra fase inmiscible (Paris, 1991). *Presión capilar: es la diferencia de presión de la interfase que separa dos fluidos inmiscibles (Paris, 1991).	Son aquellas que actúan sobre los fluidos por la acción directa de su masa con la fuerza de la gravedad y el ángulo de inclinación del yacimiento.
¿A qué se deben estas fuerzas?	Estas fuerzas se deben al flujo de fluido viscoso con una velocidad considerable a través de un medio poroso (Paris, 1991).	Estas fuerzas se deben a la presencia de dos fases inmiscibles en el yacimiento (Paris, 1991).	Estas fuerzas se deben a la atracción de la tierra (Paris, 1991).
¿Qué efectos causan al yacimiento?	Estas fuerzas obstaculizan el flujo de fluido creando una caída de presión desfavorable.	Ayuda al desplazamiento de una de las fases a causa de la fuerza que le impone la otra fase inmiscible.	Ayuda al movimiento del fluido en forma vertical y algunas veces causa movimiento no solo en la dirección vertical sino también en la dirección horizontal en presencia de un ángulo de buzamiento.
¿Cuándo son considerables?	Al desplazar fluidos viscosos a una buena velocidad de desplazamiento.	Al desplazar un fluido con otro siendo inmiscibles los dos. (Inyección de agua).	Es de gran importancia en yacimientos de gran espesor y con un ángulo de buzamiento considerable.
¿En La Hocha qué fuerzas están predominando?	Predominan cuando se de inicio al proceso de calentamiento, debido al aumento en la velocidad de producción cuando se experimente la reducción en la viscosidad del fluido.	Son despreciables como mecanismo, debido a que en el yacimiento en consideración no se esta realizando inyección de fluidos.	Dado que el yacimiento tiene un espesor considerable y un ángulo de buzamiento bastante marcado es lógico asumir que este tipo de fuerzas están predominando y además es la principal causante de que éste produzca.

Una configuración 3D correspondiente a un cuarto de un patrón invertido de cinco puntos fue seleccionada como el arreglo más apropiado para estudiar el proceso de calentamiento eléctrico en el modelo. Todas las propiedades referentes al prototipo de campo establecido para La Hocha se presentan en la Tabla 5. Estos datos son los valores de referencia a partir de los cuales se escalan las propiedades del modelo haciendo empleo de la aproximación seleccionada y de los grupos de similitud obtenidos. Los subíndices M y P empleados en las ecuaciones denotan las propiedades del modelo y del prototipo respectivamente.

a) Factor de escala y geometría del modelo: Para este estudio, se determinó una longitud máxima de 0,25 m [0,82 ft] en las dimensiones “x” y “y” del modelo. Con esta suposición, el factor de escala y el espesor del modelo son los siguientes:

$$a = \frac{x_p}{x_M} \tag{1}$$

$$a = \frac{70,71}{0,25} \Rightarrow a = 282,84 \tag{2}$$

Tabla 4. Aproximaciones para la construcción de modelos escalados

APROXIMACIONES	TIPOS DE MODELOS	CONDICIONES EN EL MODELO Y EN EL PROTOTIPO.	ASPECTOS QUE PERMITE ESCALAR	ASPECTOS QUE NO SE PUEDEN ESCALAR
I. Stegemeier <i>et al.</i> , 1980.	Baja presión.	Diferentes fluidos, diferente medio poroso, diferente caída de presión y similaridad geométrica.	<ul style="list-style-type: none"> • Geometría. • Fuerzas viscosas. • Fuerzas gravitacionales • Distribución de temperaturas. • Velocidad. 	
II. Pujol and Boberg, 1972.	Alta presión.	Mismos fluidos, diferente medio poroso, diferente caída de presión, y similaridad geométrica.	<ul style="list-style-type: none"> • Geometría. • Fuerzas viscosas. • Fuerzas gravitacionales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Propiedades que dependen de la presión. • Saturaciones irreducibles. • Permeabilidades relativas.
III. Kimber <i>et al.</i> (1988).	Alta presión.	Mismos fluidos, mismo medio poroso, misma caída de presión y similaridad geométrica.	<ul style="list-style-type: none"> • Propiedades que dependen de la presión. • Saturaciones irreducibles. • Permeabilidades relativas. • Efectos de difusión. • Fuerzas viscosas. • Transferencia de calor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerzas gravitacionales.
IV. Kimber <i>et al.</i> (1988).	Alta presión.	Mismos fluidos, mismo medio poroso, misma caída de presión y similaridad geométrica relajada. El yacimiento debe ser horizontal y de poco espesor.	<ul style="list-style-type: none"> • Propiedades que dependen de la presión. • Saturaciones irreducibles. • Permeabilidades relativas. • Efectos de difusión. • Fuerzas viscosas. • Efectos gravitacionales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Conducción de calor en la dirección vertical. • Fuerzas capilares. • Efectos de dispersión.
V. Kimber <i>et al.</i> (1988).	Alta presión.	Mismos fluidos, mismo medio poroso, misma caída de presión y similaridad geométrica relajada. El yacimiento debe ser de poco espesor.	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos de dispersión a altas tasas. • Efectos viscosos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos gravitacionales. • Efectos capilares.
VI. Kimber <i>et al.</i> (1988).	Alta presión.	Mismos fluidos, diferente medio poroso, diferente caída de presión y similaridad geométrica relajada. El yacimiento debe ser de poco espesor.	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos de gravedad. • Efectos de dispersión. • El tiempo del experimento es muy grande. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerzas capilares. • Conducción de calor dentro del yacimiento.
**Tomada de Kimber <i>et al.</i> (1988).				

PRINCIPIOS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DE UN MODELO FÍSICO

Tabla 5. Propiedades del prototipo de campo para La Hocha

PROPIEDAD DE LA FORMACIÓN DE INTERÉS	VALOR	UNIDADES
Profundidad	1021,08 [3350]	m[ft]
Longitudes del patrón establecido en las dimensiones "x" y "y"	70,71 [231,98]	m[ft]
Espesor	23 [75,5]	m[ft]
Presión actual	10638,6 [1543]	kPa [psi]
Presión de burbuja	8515,02 [1235]	kPa[psi]
Presión de fondo fluyendo	4136,85 [600]	kPa[psi]
Viscosidad del crudo	0,064 [64]	Pa*s[cp]
Radio del pozo	0,08 [0,2615]	m[ft]
Temperatura de yacimiento	319,82 [116]	K[°F]
Máxima temperatura a alcanzar cerca de la cara del pozo	383,15[230]	K[°F]
Permeabilidad promedio	0,099 [100]	μm ² [md]
Porosidad promedio	0,18	
Gravedad API del crudo	17	
Saturación de agua inicial	0,2	
Resistividad de la formación	177,45	Ω.m[psi]
Resistividad del agua a 23,88°C	0,34	Ω.m[psi]
ppm de NaCl en el agua	29413	
Angulo de buzamiento	73,7	
Espaciamiento entre pozo de inyección y producción	100 [328]	m[ft]
PROPIEDAD DE LAS FORMACIONES ADYACENTES	VALOR	UNIDADES
Resistividad de las formaciones	10	Ω.m[psi]
Saturación de agua inicial	1	
Porosidad promedio	0,15	
Espesor	14,14 [46,4]	m[ft]

$$z_M = \left(\frac{x_M}{x_P} \right) z_P$$

$$z_M = \left(\frac{1}{282,84} \right) * 23 = 0,081 m [0,27 ft] \tag{3}$$

Debido a condiciones técnicas, y analizando el diseño de pozos de otros modelos de recobro térmico como los de Bansal and Islam (1994), el diámetro interno de los pozos se consideró de ¼ de pulgada, es decir, 0,00635 m. La Figura 1 representa la configuración del modelo a desarrollar.

b) Temperatura del modelo: Se calculan los diferenciales de temperatura a manejar en el prototipo y en el modelo.

$$\Delta T_p = 383,15 - 319,82 = 63,33 [K]$$

$$\Delta T_M = 377,6 - 297,04 = 80,56 [K] \tag{4}$$

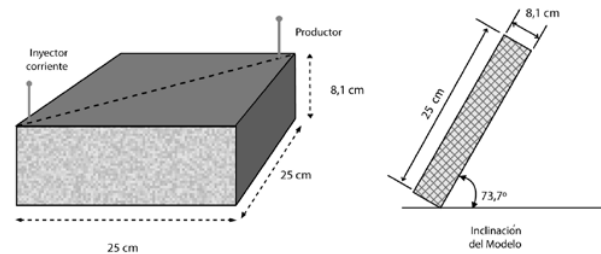


Figura 1. Escalamiento geométrico del modelo

c) Selección de las propiedades del fluido: El aceite lubricante tipo SAE 50 fue seleccionado como el fluido más opcionado para el modelo por sus propiedades y comportamiento similar al crudo de la Hocha. Este comportamiento es apreciable en la Figura 2.

Las propiedades de los fluidos empleados tanto en el modelo como en el prototipo de campo a las condiciones de operación son presentadas en la Tabla 6.

d) Escalamiento de la presión en el modelo: La caída de presión en el modelo es escogida de tal forma que la relación de fuerzas gravitacionales a fuerzas viscosas sea escalada (Stegemeier *et al.*, 1980, y Kimber *et al.*, 1988).

Tabla 6. Propiedades de los fluidos del prototipo y modelo

PROPIEDAD	PROTOTIPO	MODELO
ρ_w [g/cm ³]	0,991	1,00051
ρ_o [g/cm ³]	0,935	0,895
μ_w [cp]	0,63	4,35
μ_o [cp]	64	442,57
h_w [Btu/lb]	114,49	147,18
h_o [Btu/lb]	51,41	64,46

• Proceso de calentamiento sin inyección de salmuera:

$$\Delta P_M = \left(\frac{z_M}{z_P} \right) \left(\frac{\rho_M}{\rho_P} \right) \Delta P_P$$

$$\Delta P_M = \left(\frac{x_M}{x_P} \right) \left(\frac{\rho_M}{\rho_P} \right) \Delta P_P$$

$$\Delta P_M = \left(\frac{1}{a} \right) \left(\frac{\rho_{oM}}{\rho_{oP}} \right) \Delta P_P \tag{5}$$

El diferencial de presión en el prototipo de campo y en el modelo es:

$$\Delta P_P = P_{jxc} - P_{wf}$$

$$\Delta P_P = (10638,6 - 4136,85) = 6501,75 \text{ kPa} [943 \text{ psi}]$$

$$\Delta P_M = \left(\frac{1}{282,84} \right) \left(\frac{0,895}{0,935} \right) 6501,75 = 22 \text{ kPa} [3,2 \text{ psi}] \tag{6}$$

Assumiendo en el modelo una P_{wf} igual a la presión atmosférica, la presión promedio en el modelo es:

$$P_M = \Delta P_M + P_{wf}$$

$$P_M = 22 + 99,9 = 121,9 \text{ kPa} [17,7 \text{ psi}] \tag{7}$$

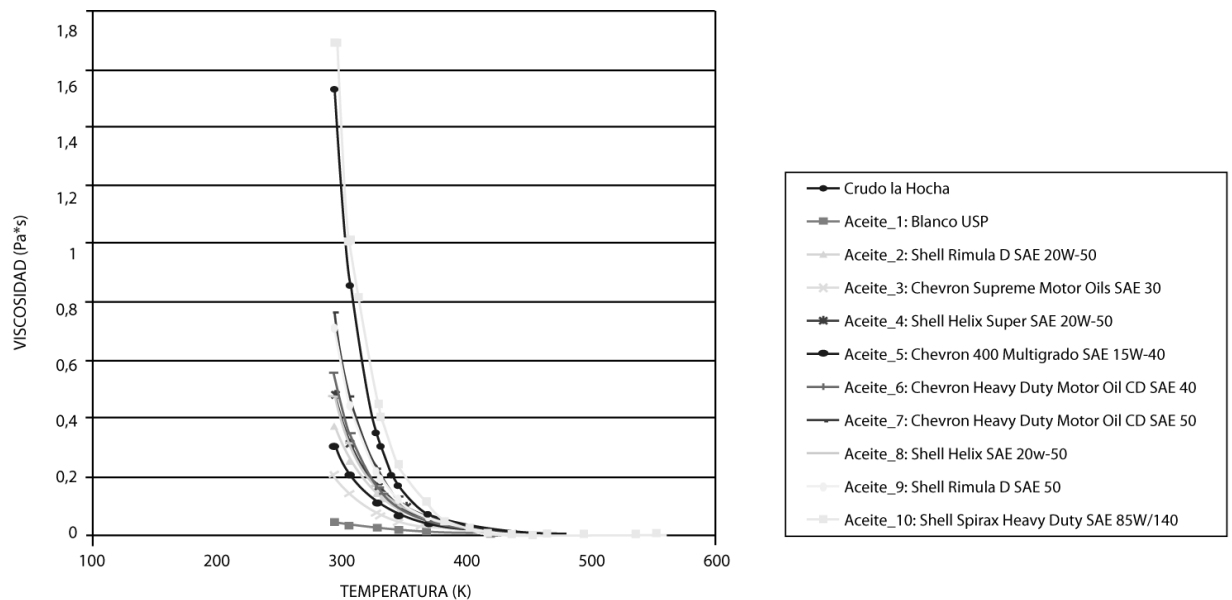


Figura 2. Selección del aceite para el modelo

• Proceso de calentamiento con inyección de salmuera: Este escenario fue considerado para mejorar la eficiencia del proceso y prevenir sobrecalentamiento en la cara del pozo.

El diferencial de presión en el prototipo de campo y en el modelo es:

$$\Delta P_p = P_{in'} - P_{wf} \quad (8)$$

$$\Delta P_p = (12755,3 - 4136,85) = 8618,45 \text{ kPa} [250 \text{ psi}]$$

$$\Delta P_M = \left(\frac{1}{282,84} \right) \left(\frac{1,00}{0,991} \right) 8618,45 = 30,76 \text{ kPa} [4,46 \text{ psi}]$$

$$P_{in'M} = \Delta P_M + P_{wf'M}$$

$$P_{in'M} = 30,76 + 99,9 = 130,6 \text{ kPa} [18,9 \text{ psi}] \quad (9)$$

e) Escalamiento de la permeabilidad en el modelo: La permeabilidad se determina siguiendo la formulación de Kimber *et al.* (1988), en donde se utiliza el siguiente grupo adimensional que relaciona la transferencia de calor convectiva y conductiva:

$$K_M = \left(\frac{\mu_{oM}}{\mu_{oP}} \right) \left(\frac{\lambda_{fM}}{\lambda_{fP}} \right) \left(\frac{\Delta T_{\max M}}{\Delta T_{\max P}} \right) \left(\frac{\Delta P_p}{\Delta P_M} \right) \left(\frac{\rho_{oP}}{\rho_{oM}} \right) \left(\frac{h_{oP}}{h_{oM}} \right) K_P \quad (10)$$

• Conductividades térmicas para el prototipo y el modelo: El cálculo detallado de estas propiedades fue realizado siguiendo el proceso descrito por Gómez (1989):

$$\lambda_{fP} = 0,18027 \text{ W/m} \cdot \text{K} \left[0,312 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ \text{F} \right]$$

$$\lambda_{fM} = 0,155 \text{ W/m} \cdot \text{K} \left[0,268 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ \text{F} \right]$$

Con estos datos, la permeabilidad en el modelo a partir de la Ecuación 10 es igual a:

$$K_M = \left(\frac{442,57}{64} \right) \left(\frac{0,155}{0,18027} \right) \left(\frac{145}{114} \right) \left(\frac{943}{3,2} \right) \left(\frac{0,935}{0,895} \right) \left(\frac{51,41}{64,46} \right) 0,099 = 183,83 \mu\text{m}^2 [186,27 \text{ darcys}]$$

f) Escalamiento del potencial eléctrico aplicado al modelo: Para escalar adecuadamente el potencial eléctrico que se requiere aplicar al medio se emplea el siguiente grupo adimensional generado a partir de esta investigación:

$$\Phi_{eM}^2 = \left(\frac{R_{fM}}{R_{fP}} \right) \left(\frac{\lambda_{fM}}{\lambda_{fP}} \right) \left(\frac{\Delta T_M}{\Delta T_P} \right) \Phi_{eP}^2 \quad (11)$$

En la Tabla 7 se presentan los resultados del cálculo de las propiedades resistivas a partir de la ecuación de Archie (Bassiouni, 1994).

Tabla 7. Propiedades resistivas del agua y de la formación

PROPIEDAD	PROTOTIPO	MODELO
$R_w [\Omega \cdot \text{m}]$	0,23	0,34
F	30,86	9
$R_f [\Omega \cdot \text{m}]$	177,45	76,5

Reemplazando los valores correspondientes en la Ecuación 11:

$$\Phi_{eM}^2 = \left(\frac{76,5}{177,45} \right) \left(\frac{0,155}{0,18027} \right) \left(\frac{145}{114} \right) (480)^2 = 108627,38$$

$$\Phi_{eM} = \sqrt{108627,38} = 329,58 \text{ V}$$

g) Escalamiento de la tasa de inyección de salmuera: La tasa de inyección se escala utilizando el grupo propuesto por Kimber *et al.* (1988) para establecer este parámetro:

$$W_{salmueraM} = \left(\frac{K_M}{K_P} \right) \left(\frac{\Delta P_M}{\Delta P_P} \right) \left(\frac{z_M}{z_P} \right) \left(\frac{\rho_{wM}}{\rho_{wP}} \right) \left(\frac{\mu_{wP}}{\mu_{wM}} \right) W_{salmueraP} \quad (12)$$

Para una tasa de inyección de salmuera de 1,59 m³/día [10 bb/día] en el prototipo de campo, la tasa de inyección equivalente en el modelo es:

$$W_{salmueraM} = \left(\frac{183,33}{0,099} \right) \left(\frac{30,76}{8618,45} \right) \left(\frac{8,1}{2300} \right) \left(\frac{1,00}{0,991} \right) \left(\frac{0,63}{4,35} \right) * 1,59 = 0,00541 \text{ m}^3/\text{día} = 0,0626 \left[\text{cc}/\text{seg} \right]$$

h) Escalamiento del tiempo en el modelo: El tiempo en el modelo puede escalarse mediante el siguiente grupo (Stegemeier *et al* 1980 y Kimber *et al.* 1988):

$$t_M = \left(\frac{\rho_{oM}}{\rho_{oP}} \right) \left(\frac{C_{oM}}{C_{oP}} \right) \left(\frac{x_M^2}{x_P^2} \right) \left(\frac{\lambda_{jP}}{\lambda_{jM}} \right) t_P$$

$$t_M = \left(\frac{0,895}{0,935} \right) \left(\frac{0,445}{0,45} \right) \left(\frac{0,25^2}{70,71^2} \right) \left(\frac{0,18027}{0,155} \right) * t_P = 1,38 \times 10^{-5} t_P \quad (13)$$

Para un periodo de seis meses de calentamiento en el prototipo, el tiempo equivalente en el modelo es igual a 3,63 minutos.

i) Escalamiento de las formaciones adyacentes: El escalamiento de la resistividad de las formaciones adyacentes se efectúa empleando el siguiente grupo, también generado a partir de la investigación:

$$R_{faM} = \left(\frac{R_{jM}}{R_{jP}} \right) \left(\frac{\lambda_{jM}}{\lambda_{jP}} \right) \left(\frac{\lambda_{faP}}{\lambda_{faM}} \right) R_{faP} \quad (14)$$

La conductividad térmica de la arcilla en el prototipo de campo y en el modelo (Gómez, 1989) es:

$$\lambda_{faP} = 0,278 \text{ W/m} \cdot \text{K} \left[0,481 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft} \cdot \text{°F} \right]$$

$$\lambda_{faM} = 0,221 \text{ W/m} \cdot \text{K} \left[0,383 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft} \cdot \text{°F} \right]$$

Finalmente, con los datos anteriores y la Ecuación 14, se obtiene:

$$R_{faM} = \left(\frac{76,5}{177,45} \right) \left(\frac{0,155}{0,18027} \right) \left(\frac{0,278}{0,221} \right) * 10$$

$$R_{faM} = 4,66 \Omega \cdot \text{m}$$

Una vez escalado el valor de la resistividad de las formaciones adyacentes, se debe seleccionar un material que cumpla con esta especificación.

En la Tabla 8 se resumen los resultados obtenidos del escalamiento para el prototipo de campo.

VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos fueron sometidos a una validación con la ayuda del simulador térmico S.T.A.R.S.

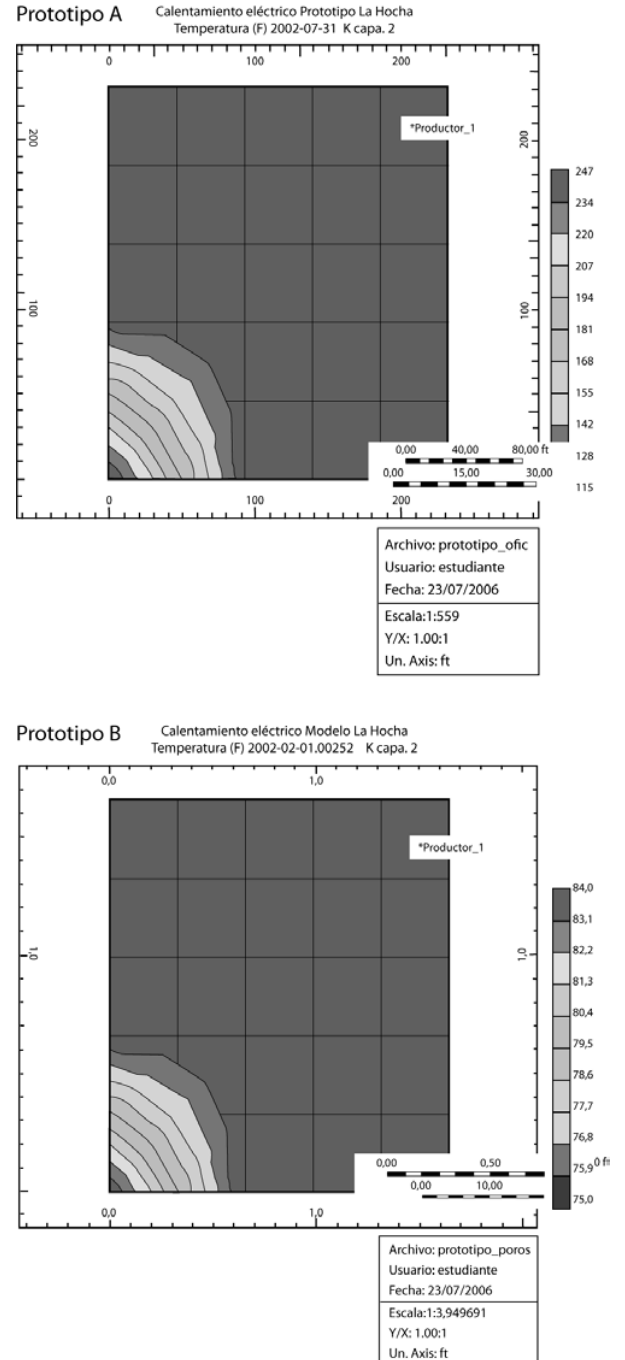


Figura 3. Distribución de temperatura areal. A: Prototipo. B: Modelo

de CMG®. El objetivo primordial de esta validación es determinar la consistencia de los grupos de escalamiento obtenidos frente a los balances de masa y energía implíci-

Tabla 8. Propiedades para el prototipo de campo y el modelo físico escalado

PARÁMETRO	VALOR PROTOTIPO DE CAMPO	UNIDADES	VALOR MODELO FÍSICO	UNIDADES
Largo	70,71	m	0,25	m
Esesor neto de la arena de interés	23	m	0,081	m
Ancho	70,71	m	0,25	m
Radio promedio del pozo	0,0797	m	0,00635	m
Porosidad de la formación de interés	0,18		0,30	
Permeabilidad Promedio	0,099	µm ²	183,83	µm ²
Temperatura del yacimiento	319,82	K	297	K
Presión	10638,6	kPa	121,9	kPa
Viscosidad del crudo	0,064	Pa*s	0,443	Pa*s
Gravedad API crudo	17		25,7	
Saturación de agua inicial en la formación de interés	0,2		0,2	
Resistividad de la formación de interés	177,45	Ohm-m	76,5	Ohm-m
Potencia disipada en la formación de interés	26,3	KW	0,218	KW
Corriente en la formación de interés	54,8	A	0,66	A
Conductividad térmica de la formación de interés	0,18027	W/m*K	0,155	W/m*K
Presión de fondo fluyendo	4136,85	kPa	99,9	kPa
Presión de inyección de salmuera	12755,3	kPa	130,6	kPa
Resistividad de los estratos adyacentes	10	Ohm-m	4,66	Ohm-m
Conductividad térmica de los estratos adyacentes	0,278	W/m*K	0,221	W/m*K
Esesor neto de las formaciones adyacentes	14,14	m	0,05	m
Porosidad de las formaciones adyacentes	0,15		0,30	
Saturación de agua inicial en las formaciones adyacentes	1		0,55	
Tasa de inyección de salmuera	1,59	m ³ /día	0,00541	m ³ /día
Voltaje aplicado	480	voltios	329,58	voltios
Angulo de inclinación	73,7	grados	73,7	grados
Tiempo de calentamiento	6	meses	3,63	min
Máxima temperatura alcanzada cerca de la cara del pozo	383,15	K	377,6	K

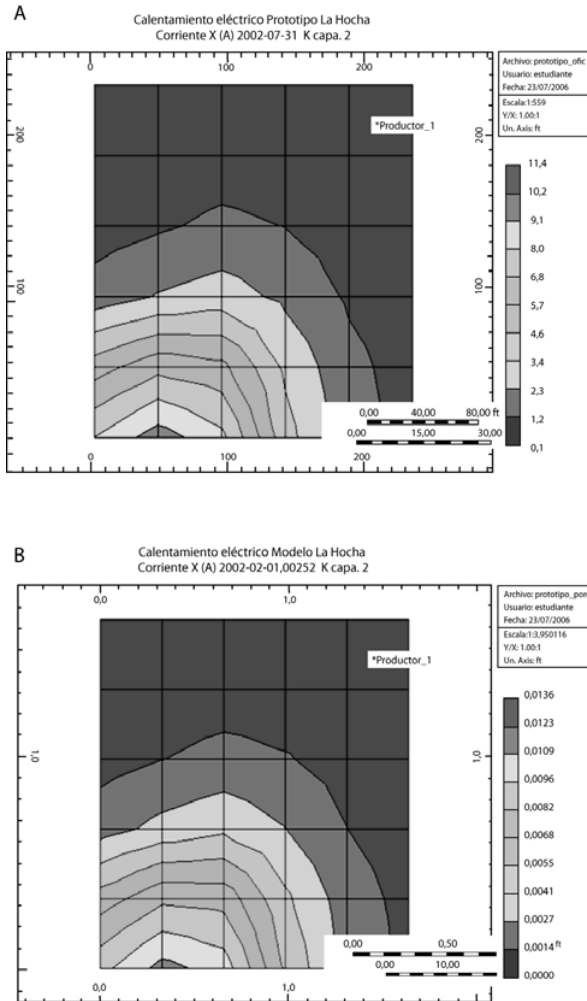


Figura 4. Distribución de la corriente. A: Prototipo. B: Modelo

tos en los simuladores numéricos. Tanto el modelo como el prototipo de campo fueron cargados en el simulador, se realizaron las corridas para un tiempo de calentamiento de seis meses en el prototipo, equivalente a 3,63 minutos en el modelo obteniéndose las distribuciones de temperatura y corriente ilustradas en las Figuras 3, 4 y 5. Para las distribuciones de temperatura y corriente obtenidas, se observa un comportamiento similar en cuanto a la predicción del fenómeno y la tendencia del proceso de calentamiento. Sin embargo, no se conserva una relación lineal entre las temperaturas alcanzadas en las celdas cerca a la cara del pozo; es decir, en el modelo el frente de calentamiento alcanza una distancia levemente mayor a la esperada.

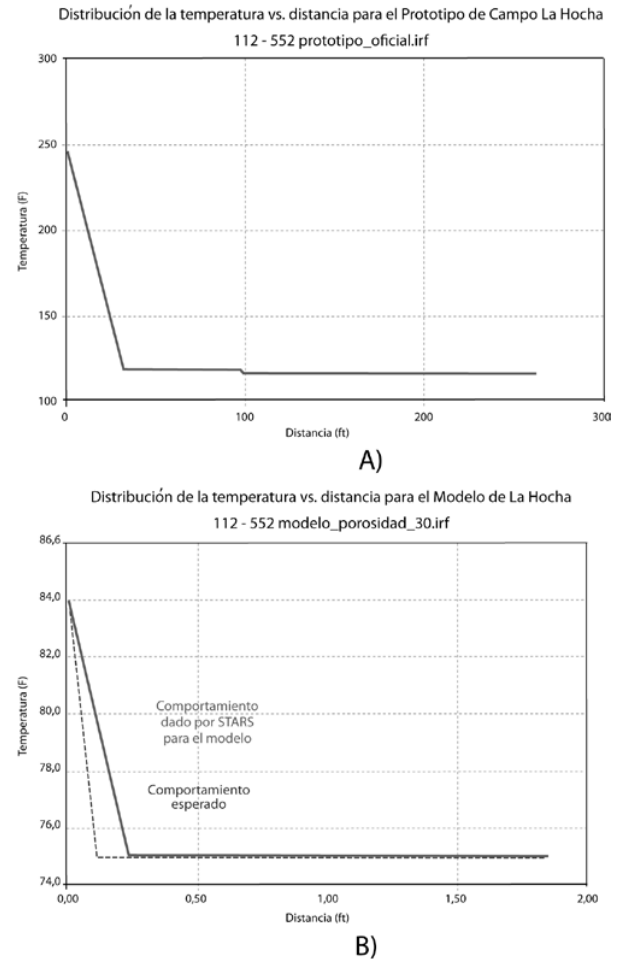


Figura 5. Distribución de temperatura vs. distancia. A: Prototipo. B: Modelo

Esta diferencia en comportamiento puede ser causa del empleo de fluidos diferentes al del yacimiento y de la porosidad alcanzada en el modelo, que hace que la corriente eléctrica alcance mayor penetración debido a la presencia de un volumen superior en saturación de agua connata en el espacio poroso.

A partir de los resultados obtenidos puede concluirse que los grupos de escalamiento generados de esta investigación (especialmente los grupos que relacionan la tensión con las propiedades eléctricas y térmicas del medio) y las suposiciones establecidas en el proceso, son consistentes en un alto grado con los balances de masa y energía planteados por los modelos numéricos tradicionalmente empleados para calentamiento eléctrico. Este hecho es evidenciable en la tendencia similar

de las curvas de comportamiento térmico obtenidas entre el modelo y el prototipo de campo para distancias equivalentes en términos de escalamiento.

CONCLUSIONES

- El modelo físico parcialmente escalado dimensionado para reproducir el calentamiento eléctrico en el campo La Hocha, satisface los criterios de similitud geométrica, mecánica y térmica entre el modelo y el prototipo de campo.
- Mediante análisis inspeccional se dio origen a un completo grupo de parámetros de escalamiento que pueden emplearse para reproducir físicamente el proceso de calentamiento eléctrico resistivo. Se destaca mediante esta investigación el planteamiento de los grupos que permiten escalar la tensión requerida en el modelo y la resistividad de las formaciones adyacentes.
- El modelo físico propuesto trabaja a baja presión, baja temperatura y con fluidos (crudo y agua) diferentes a los encontrados en la formación.
- El empaque de arena formulado para el modelo estará constituido de agregados provenientes de la formación Monserrate (unidad productora de La Hocha), pero reproduciendo en laboratorio un valor de porosidad y permeabilidad superiores al observado en el campo.
- Mediante la validación realizada en S.T.A.R.S. se determinó la validez del escalamiento y de los grupos formulados. Se espera que el frente de calentamiento en el modelo sea de mayor alcance que el esperado en el campo.

RECOMENDACIONES

Una vez concluida la fase de construcción y pruebas en el simulador físico, es necesario continuar con una investigación más detallada que permita cotejar datos reales de producción arrojados por los modelos físico

y numérico. El resultado de esta segunda fase de validación y ajuste permitirá definir un modelo matemático acorde con el comportamiento real del yacimiento ante el estímulo de la corriente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Colciencias y a los ingenieros Hubert Borja, Álvaro Hernández, William Girón y Juan Carlos Trujillo de Hocol S.A por el apoyo y la colaboración suministrada durante el desarrollo de esta investigación. También agradecen la colaboración del profesor Farouq-Ali por la orientación técnica brindada.

BIBLIOGRAFÍA

- Bansal, A., & Islam, M. R. (1994). Scaled model studies of heavy oil recovery from an alaskan reservoir using gravity-assisted gas injection. *J. Can. Pet. Technol.*, 33 (6), 52-62.
- Bassiouni, Z. (1994). *Theory, measurement and interpretation of well logs*. SPE Textbook Series. Volume 4.
- Chakma, A., & Jha, K. N. (1992). Heavy-oil recovery from thin pay zones by electromagnetic heating. *67th Annual Technical Conference and Exhibition, SPE 24817: 525-534*
- Croes, G. A., & Schwarz, N. (1955). Dimensionally scaled experiments and the theories on the water drive process. *Trans. Amer. Inst. Min. Eng.*, 204, 35.
- Farouq, A. (1993a). *Diseño de modelos escalados (Video conferencia)*. Instituto Colombiano del Petróleo –ICP– Bucaramanga, Colombia.
- Farouq, A. (1993b). *Design of scaled models*. University of Alberta, Edmonton, Canada.
- Gómez, G. (1989). *Recuperación mejorada de hidrocarburos: inyección cíclica y continua de vapor*. Universidad Industrial de Santander-UIS-, Bucaramanga, Colombia.
- Harvey, A. H, Arnold, M. D., & El-Feky . (1979). Selective electric reservoir heating. *J. Can. Pet. Technol.*, 47-57.
- Hiebert, A. D., Vermeulen, F. E., Chute, F. S., & Capjack, C. E. (1986). Numerical simulation results for the electrical heating of athabasca oil-sand formations. *Reservoir Engineering, SPE 13013: 76-84*.

- Kimber, K. D., Farouq, A., & Puttagunta, V. R. (1988). New scaling criteria and their relative merits for steam recovery experiments. *J. Can. Pet. Technol*, 27(4), 86-94.
- Leverett, M. C., Lewis, W. B., & True, M. E. (1942). Dimensional-model studies of oil-field behavior. *Trans. Amer. Inst. Min. Eng.*, 146, 175.
- Manual del simulador STARS 2005.
- Paris, F. M. (1991). *Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos* (Segunda edición). Astro Data S.A.
- Pujol, L. and Boberg, T. C. (1972). Scaling accuracy of laboratory steamflooding models. SPE 4191: 1-7 Rapoport, L.A. (1955). Scaling laws for use in design and operation of water-oil flow models. *Trans. Amer. Inst. Min. Eng.*, 204, 143-150.
- Stegemeier, G. L., Laumbach, D. D., & Volek, C. W. (1980). Representing steam processes with vacuum models. *52nd Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 6787: 151-174.
- Wygol, R. J. (1963). Construction of models that simulate oil reservoirs. SPE 534:281-286.
- Yuan, J. Y., Huang, H., Mintz, R., Wang, X., Jossy, C. & Tunney, C. (2004). Wet electric heating for starting up SAGD/VAPEX. *55th Annual Technical Meeting, Can. Inst. Min., Metal. Pet.*, 1-12.