

# MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL PROCESO DE DESPRESURIZACIÓN DE YACIMIENTOS DE HIDRATOS CON CAPA DE GAS LIBRE

Javier Omar Caicedo Duran<sup>1</sup>, Nelson Alonso Pinto Vargas<sup>2</sup>, Nicolas Santos Santos<sup>3</sup>

## RESUMEN

La simulación de yacimientos de hidratos es de primordial importancia para estudiar el comportamiento de la producción de gas a partir de esta fuente de hidrocarburos. En este artículo se presenta un modelo matemático para el proceso de despresurización de un yacimiento de hidratos en contacto con una capa de gas libre; el modelo utiliza ecuaciones de flujo de gas en medios porosos, conducción de calor y propiedades de los hidratos de metano y el gas; con el modelo se desarrolló (en lenguaje Visual Fortran) el software SDYHGAS, para realizar la validación numérica.

Los resultados obtenidos indican que la despresurización es una alternativa viable para explotar yacimientos de hidratos de metano asociados a una capa de gas libre. La despresurización, por si sola, es capaz de inicializar la disociación de la capa de hidratos; el calor consumido en el proceso es suministrado por el yacimiento y las formaciones adyacentes.

**Palabras claves:** yacimientos de hidratos, producción de gas, despresurización, disociación, modelamiento, simulación.

## ABSTRACT

The hydrates deposits simulation is very important to study the gas production behavior from this hydrocarbon source. In this paper it is presented a mathematical model for the hydrates reservoir depressurization process in contact with a free gas layer. The model employs equations of gas flow in porous media, heat conduction and properties of methane hydrates and gas; SDYHGAS software was developed in Visual Fortran language with this model, to carry out the numeric validation.

<sup>1</sup> Ingeniero de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

<sup>2</sup> Ingeniero de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

<sup>3</sup> Ingeniero de Petróleos, Docente Universidad Industrial de Santander.

Results indicate that depressurization is a feasible technique for methane hydrates reservoir with free gas layer production. Depressurization is able to initialize the dissociation of hydrate layer; the heat consumed in the process is given by the reservoir and the adjacent formations.

**Keywords:** hydrate reservoir, gas production, depressurization, dissociation modelling, simulation.

## INTRODUCCIÓN

Los yacimientos de hidratos de gas son constituidos por compuestos sólidos de gas y agua semejantes al hielo (las moléculas de agua forman estructuras que alojan moléculas de metano o cualquier gas liviano) que ocupan el espacio poroso. Los yacimientos de hidratos se localizan en fondos oceánicos (Colombia posee este tipo de cuencas) y en regiones glaciales donde las condiciones termodinámicas son propicias para la formación y estabilidad de los hidratos.

La explotación de depósitos de hidratos requiere la creación de condiciones que permitan el proceso de descomposición del hidrato en el medio poroso. Estas condiciones son obtenidas alterando el equilibrio termodinámico mediante reducción de la presión (despresurización), incremento de la temperatura y procesos químicos. La alteración del equilibrio termodinámico del hidrato provoca el desprendimiento (disociación) de los compuestos formadores (gas natural y agua).

El proceso de disociación mediante despresurización se explica de la siguiente manera:

1. Reducción de la presión del gas libre asociado al hidrato por debajo de la presión de disociación.
2. El inicio de la disociación implica un enfriamiento causado por la naturaleza endotérmica del proceso por lo que la temperatura cae hasta la temperatura de disociación a la nueva presión.

3. Se forma un gradiente de temperatura entre los hidratos y el medio circundante.
4. El gas disociado se extrae junto con gas libre adicional para continuar la despresurización.

En yacimientos de hidratos con capa de gas la tasa de disociación de hidratos puede determinarse por el movimiento de la interfase hidrato-capa de gas, sin tener en cuenta la cinética intrínseca del proceso.

## MODELO MATEMÁTICO

El modelo describe el agotamiento de un yacimiento cilíndrico que contiene gas libre e hidratos de metano, los hidratos y la zona de gas se presentan estratificados pero están contenidos en un mismo medio poroso (Figura 1), el modelo asume que la zona de hidratos está encima de la zona de gas.

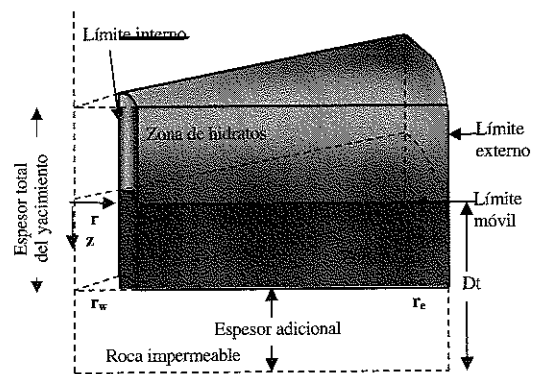


Figura 1. Esquema de una sección radial de un yacimiento de hidratos con capa de gas

## Suposiciones

1. La zona de hidratos es impermeable.
2. Los hidratos se disocian y adicionan metano a la capa de gas.
3. La temperatura en la interfase es la temperatura de disociación para la presión existente.
4. El flujo de calor hacia la interfase gas-hidrato es sólo mediante conducción
5. El agua producida por la disociación no afecta el flujo de gas.
6. La interfase gas-hidrato se mueve hacia la superficie a una tasa suficientemente lenta.
7. Equilibrio instantáneo.

**Ecuaciones que conforman el modelo.** Las ecuaciones que conforman el modelo fueron obtenidas mediante "gridblock approach" (balances discretos) para evitar errores de truncamiento.

*Distribución de presiones.* Para calcular el perfil de presiones en la zona de gas se supone que: la presión es inicialmente constante en todo el yacimiento; que no hay flujo a través de los límites; la tasa de producción y la tasa de disociación se consideran como términos sumidero y fuente, respectivamente.

$$\frac{K_g}{\phi\mu_g} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial P^2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right] = \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

*Distribución de temperaturas.* Para calcular el perfil de temperatura en la zona de gas se supone que: la temperatura es inicialmente constante en todo el yacimiento; la temperatura en cada punto de la interfase (límite móvil) corresponde a la temperatura de disociación a la presión de aquel punto; la temperatura a una distancia considerable ( $\Delta L$ ) de la interfase

(límite móvil) permanece constante a la temperatura inicial; los límites interno y externo son de no-flujo y el perfil de temperatura es reflejado arriba de la interfase. Por lo tanto, el flujo total de calor hacia la interfase es dos veces el flujo de calor desde la zona de gas.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T_n(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 T_n(r, z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\sigma_n} \frac{\partial t_n(r, z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

**Balance de energía.** La tasa a la cual el hidrato se disocia en la interfase es determinada por un balance de energía en el que se considera que el calor transferido a la interfase debido al gradiente de temperatura es usado para disociar el hidrato.

$$2 * \kappa_R * A * \frac{\partial T}{\partial z} = E_D * \frac{dm_{hd}}{dt} \quad (3)$$

$\kappa_R$  es la conductividad térmica del yacimiento,  $dm_{hd}/dt$  es la tasa másica de disociación del hidrato de metano y  $E_D$  es la energía de disociación del hidrato. La ecuación 3 puede ser resuelta para  $dm_{hd}/dt$ , en una sección interfacial de propiedades uniformes. Las distribuciones de presión y temperatura son independientes, excepto en la interfase gas-hidrato donde la temperatura de una celda es la temperatura de disociación a la presión existente.

**Propiedades del hidrato.** Las propiedades del hidrato utilizadas en SDYHGAS son:

*Calor de disociación:* el calor de disociación se calcula mediante la siguiente ecuación empírica presentada por Selim y Sloan (1989):

$$\lambda = AT_d + B \quad (4)$$

$A$  y  $B$  son constantes empíricas.

**Equilibrio del hidrato:** SDYHGAS maneja la relación de equilibrio entre temperatura y

presión utilizando la ecuación de Kamath (1984):

$$P_e = \exp\left(e_1 + \frac{e_2}{T}\right) \quad (5)$$

Donde:

$$e_1 = \begin{cases} 38.980 \\ 14.717 \end{cases} \quad y \quad e_2 = \begin{cases} -8533.80 & \text{para } 273^\circ K \leq T \leq 298^\circ K \\ -1886.79 & \text{para } -248^\circ K \leq T \leq 273^\circ K \end{cases}$$

**Número de hidratación:** el número de hidratación representa el número de moles de agua por mol de metano en el hidrato. Los hidratos de metano tienen un número de hidratación que varía entre 5.77 y 7.4 (con promedio de 6).

**Densidad del hidrato:** La densidad de los hidratos depende del tipo de estructura (I, II o III), composición, presión y temperatura; debido a la naturaleza sólida del hidrato la densidad varía en un rango muy pequeño, por lo cual puede considerarse constante. Para los hidratos de metano se conoce una densidad típica de 912 Kg/m<sup>3</sup>.

## ALGORITMO SOLUCIÓN

1. Calcular la distribución de presiones.
2. Evaluar en qué celdas de la interfase la presión es menor que la presión de equilibrio del hidrato a la temperatura presente, en estas celdas el hidrato se disociará hasta que la nueva temperatura sea igual a la temperatura de equilibrio a la presión actual.
3. Calcular la distribución de temperaturas.
4. Calcular el calor de disociación del hidrato y el balance de energía en la interfase para cada celda.
5. Finalmente, calcular la cantidad de gas liberado y el desplazamiento de la interfase.

El gas liberado se considera en el siguiente intervalo de tiempo como una inyección.

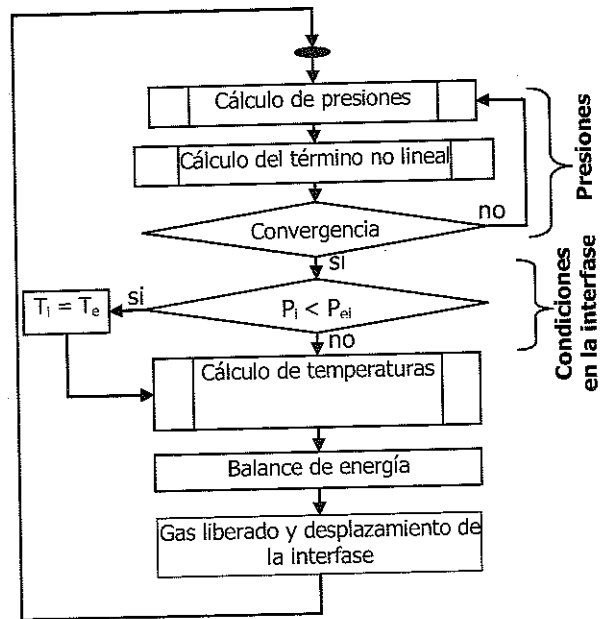


Figura 2. Algoritmo Solución.

## RESULTADOS

El modelo fue programado en lenguaje Visual Fortran obteniendo el software SDYHGAS. Los datos utilizados en la simulación son: yacimiento cilíndrico de 573 m de radio (1878.74 ft), 30.5 m (100 ft) de espesor distribuido 15.25 m en la zona de gas y 15.25 m en zona de hidratos, presión inicial de 2.05x10<sup>7</sup> Pa (3000 Psia), temperatura inicial 293.3 K (528.4698 R), porosidad del 15%, gas 100% metano, permeabilidad de la zona de gas de 4.325x10<sup>-14</sup> m<sup>2</sup> (44 md), conductividad térmica de 1.5 W/m.K (37.4476 Btu/(d\*ft\*R)), difusividad térmica de 7x10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s (0.651 ft<sup>2</sup>/día), una tasa de producción total de 0.82 m<sup>3</sup>/s (2.5x10<sup>6</sup> ft<sup>3</sup>/día), un tiempo total de 1000 días de producción.

**Validación.** La validación se realizó con los datos publicados por Holder y Angert (1982). En la figura 3 se compara la contribución acumulada (100\*producción acumulada/aporte acumulado de los hidratos), los resultados de

coinciden satisfactoriamente (el uso de geometría cilíndrica en SDYHGAS es recomendable para modelos de pozo, en lugar de geometría rectangular utilizada por Holder).

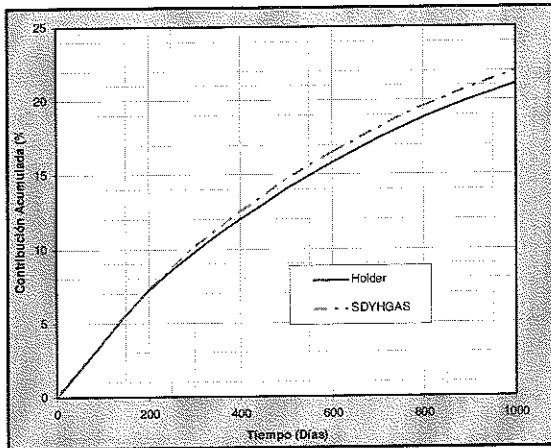


Figura 3. Contribución Acumulada según SDYHGAS y Holder.

En la figura 4 se observa los perfiles de temperatura para las celdas del pozo generados por SDYHGAS y los reportados por Holder, la temperatura en la interfase (la más baja) no ofrece peligro para la formación de hielo y la reformación del hidrato. Las diferentes geometrías utilizadas por los modelos no repercuten en gran medida en los cálculos de temperatura, esto se debe a que el flujo de calor es en su mayoría en dirección vertical, donde la geometría cilíndrica es similar a la cartesiana.

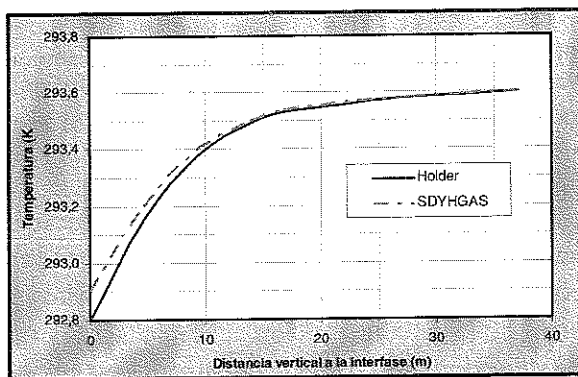


Figura 4. Distribución de temperaturas en las celdas del pozo.

**Análisis de sensibilidad.** Se realizó un análisis de la influencia de algunas propiedades típicas de los yacimientos sobre la contribución de los hidratos a la producción de gas.

La figura 5 muestra como la contribución acumulada aumenta a través del tiempo hasta que la totalidad de los hidratos son disociados, donde se interrumpe la contribución (10800 días aproximadamente).

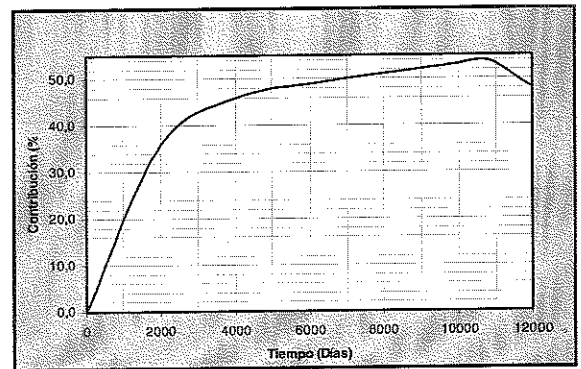


Figura 5. Contribución acumulada a largos tiempos de producción

Durante este largo periodo de producción, los hidratos se disociaron totalmente sin la necesidad de una fuente externa de energía y el yacimiento no fue totalmente agotado.

Al aumentar la tasa de producción, la contribución acumulada disminuye, la despresurización del yacimiento y el enfriamiento en las celdas del pozo son más acelerados (figura 6); lo que puede originar rehidratación y taponamiento en las cercanías al pozo. Es importante anotar que a altas tasas de producción se deben utilizar espesores adicionales para evidenciar el flujo calor desde formaciones adyacentes.

Para analizar el efecto de la porosidad del yacimiento sobre la contribución acumulada, se realizaron varias corridas utilizando porosidades entre 15 a 30 %. La figura 7 muestra que la contribución acumulada disminuye con el

incremento de la porosidad. Aunque la producción total de gas es mayor.

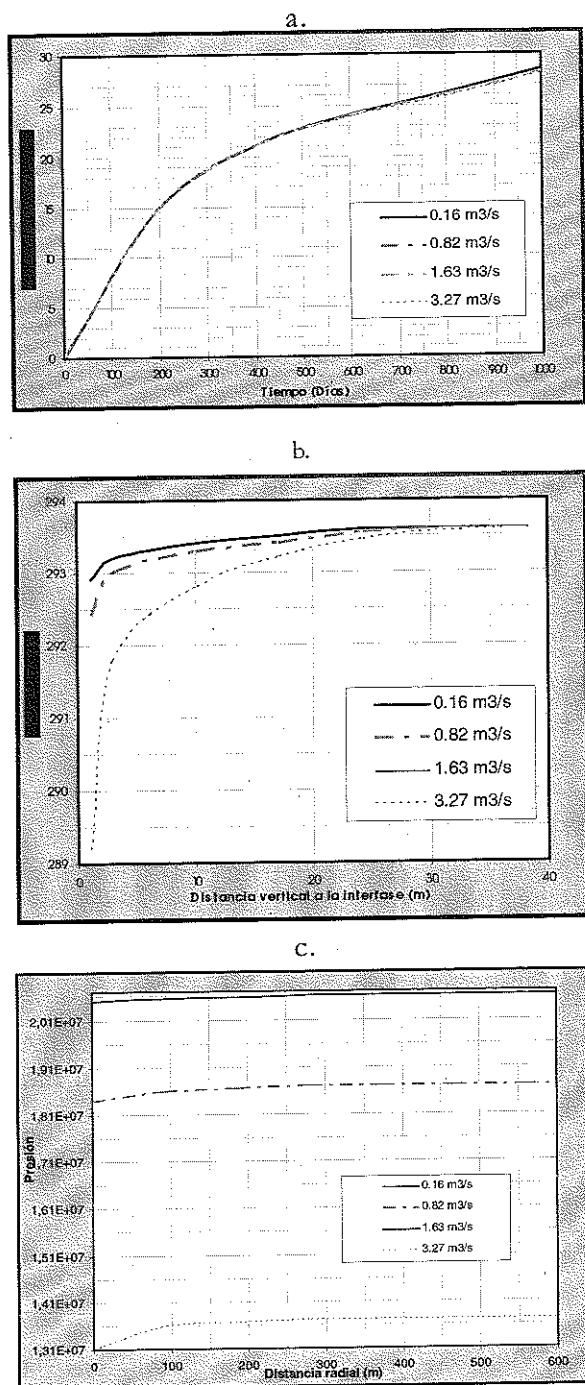


Figura 6. Efecto de la tasa de producción sobre la despresurización de yacimientos de hidratos. a. Contribución acumulada, b. Distribución de temperaturas en las celdas del pozo después de 1000 días y c. Distribución de presiones en la zona de gas después de 1000 días.

Se realizaron varias corridas variando la permeabilidad (figura 8), en un rango de  $1.474 \cdot 10^{-14}$  a  $8.846 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  (15 a 90 md), para las cuales la contribución no se vio alterada. A menores permeabilidades: el delta de presión y temperatura entre el pozo y el radio externo fue mayor, indicando mayor contribución de los hidratos cercanos al pozo.

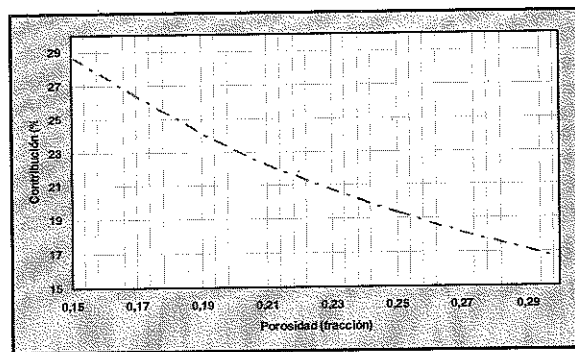


Figura 7. Efecto de la porosidad sobre el porcentaje de contribución acumulada.

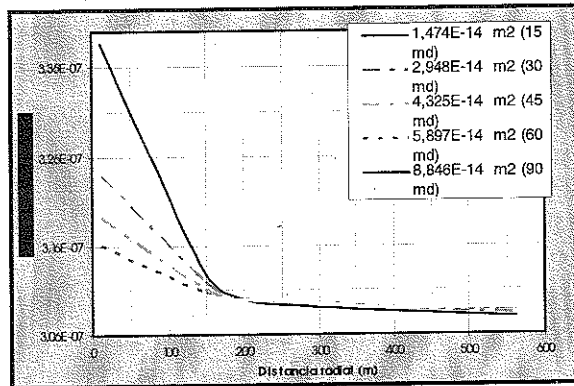


Figura 8. Tasa de disociación con respecto a la distancia al pozo para diferentes permeabilidades.

La presión inicial se estudió en un rango de  $2.06 \cdot 10^7$  a  $6.4 \cdot 10^7 \text{ Pa}$  (3000 a 9000 Psia). Al aumentar la presión fue necesario aumentar la temperatura inicial para considerar hidratos en equilibrio. La figura 9 muestra como el porcentaje de contribución acumulada aumenta casi linealmente con el aumento de la presión inicial. Este aumento se debe a que a una mayor temperatura, el calor de disociación por unidad

masa de hidrato es menor y por lo tanto, para un cambio de presión se obtienen tasas de disociación mayores y menor enfriamiento del yacimiento. En yacimientos sobrepresionados (presión mayor a la presión de equilibrio para la temperatura del yacimiento) no se presentaría contribución hasta que no se alcance condiciones de equilibrio del hidrato.

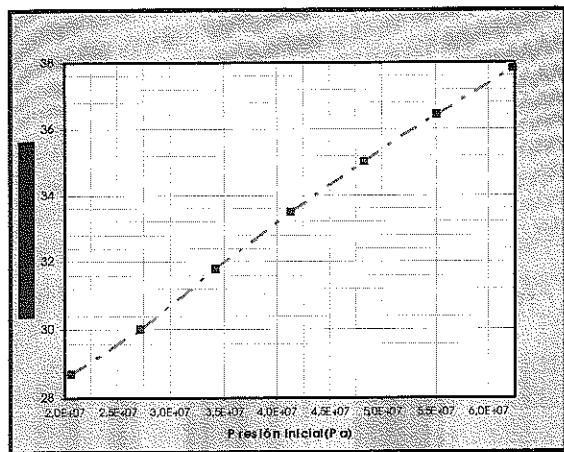


Figura 9. Variación de la contribución acumulada con respecto a la presión inicial.

## CONCLUSIONES

El modelo propuesto mejora el modelo desarrollado por Holder y Angert mediante la utilización de una geometría más apropiada (cilíndrica), utilizando "gridblock approach" para evitar errores de truncamiento al discretizar las ecuaciones.

Yacimientos de hidratos con capa de gas que tengan alta presión inicial y buenas permeabilidades son excelentes prospectos para aplicar despresurización.

La despresurización por si sola es capaz de inicializar y mantener la disociación alcanzando considerables contribuciones de los hidratos a la producción total del yacimiento. El calor consumido en el proceso de disociación es suministrado por el yacimiento y las formaciones adyacentes.

Las tasas de producción se deben manejar cuidadosamente por las siguientes razones:

- ✓ Altas tasas de producción causan enfriamiento acelerado del yacimiento provocando rehidratación en las cercanías al pozo. El enfriamiento del yacimiento depende también del flujo de calor de las formaciones adyacentes.
- ✓ Tasas de producción bastante bajas producirán los mejores resultados en materia de contribución del hidrato a la producción de gas, pero no son recomendables desde el punto de vista económico.

La contribución del hidrato a la producción del yacimiento disminuye con el aumento de la porosidad.

## NOMENCLATURA

A: área del yacimiento

$dm_{hd}/dt$ : tasa masica de disociación del hidrato de metano

$E_D$ : energía de disociación [Btu/ft<sup>3</sup>]

k: conductividad térmica [Btu/ (hr.ft.°F)]

K: permeabilidad [md]

$K_i$ : permeabilidad efectiva de la fase i [md]

P: presión [Psia]

r: radio ó coordenada radial [ft]

R: resistividad eléctrica

t: tiempo [s-hr]

T: temperatura [°F]

$T_d$ : temperatura de disociación

r, z: coordenadas

Z: profundidad del yacimiento.

### Caracteres griegos

$a_i$ : difusividad térmica de la zona ó fase i [ft<sup>2</sup>/hr]

f: Porosidad  
l: Calor (entalpía) de disociación del hidrato [Btu/Lbm]  
m: viscosidad [cp]

### Subíndices y Superíndices

d ó D: disociación ó frente de disociación  
e: equilibrio  
g: gas  
H ó h: hidrato  
i: número de celda  
n: nivel del tiempo  
r: matriz de la roca  
R: yacimiento

## REFERENCIAS

Holder, G.D. and Angert, P.F. Simulation of gas production from a reservoir containing both gas hydrates and free natural gas. New Orleans: *SPE*

11105, 1982 presented at the 57th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME (Sept 26-29, 1983).

Kamath, V.A.. *Study of heat transfer characteristics during dissociation of gas hydrates in porous media* (1984), citado por Moridis, G.J. Numerical Studies of Gas Production from Methane Hydrates. Calgary: *SPE 75691, 2002 presented at the SPE Gas Technology Symposium* (30 April-May 2, 2002),

Selim, M. S., and Sloan, E. D. Heat and Mass Transfer During the Dissociation of Hydrates in Porous Media. En: *AICHE Journal*. Vol. 35, No. 6 (June 1989); p.1050.

## AGRADECIMIENTOS

Grupo de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos de la Esc. Ing. de Petróleos UIS.

---

Recibido: 28 de junio de 2004  
Aceptado: 17 de abril de 2006