

Modelo generalizado para el análisis de pruebas de interferencia

Ricardo Posadas Mondragón
Pemex

Artículo recibido en septiembre de 2023-evaluado-correcto y aceptado en noviembre de 2023

Resumen

Se muestra una nueva solución analítica generalizada que logra representar a través de un solo modelo diferentes pruebas de interferencia, entre las cuales se encuentran las soluciones en un yacimiento infinito, con presencia de una falla, con presencia de dos fallas paralelas y con presencia de dos fallas intersectantes. Lo anterior considerando un Yacimiento Naturalmente Fracturado. Adicionalmente, se logra reproducir el efecto de presión por la ubicación de los pozos respecto a las fronteras y no sólo la distancia entre los pozos observador y activo.

Palabras clave: Prueba de interferencia, modelo generalizado, yacimiento naturalmente fracturado.

General analytical solution for interference tests analysis

Abstract

A new generalized analytical solution is obtained to analyze different interference tests through a single analytical model. This model includes different solutions: solution for infinite reservoir, solution for reservoir with a seal fault or constant pressure fault, solution for reservoir with two parallel faults and solution for reservoir with two intersecting faults for any angle. The model considers a Naturally Fractured Reservoir, also is reproduced the pressure effect due to the location of the wells with respect to the faults in addition to the distance between wells.

Keywords: Interferences test, general analytical solution, naturally fractured reservoir.

Introducción

En la literatura existen soluciones analíticas publicadas para modelar las pruebas de interferencia entre pozos, entre las cuales se encuentran:

- 1) Solución fuente cilíndrica para yacimientos infinitos
- 2) Solución ante la presencia de una falla
- 3) Solución para flujo lineal originado por la presencia de fallas paralelas
- 4) Solución para fallas intersectantes en cualquier ángulo
- 5) Solución para un yacimiento finito cerrado circular/rectangular

En este trabajo, se plantea un modelo generalizado que logra representar las primeras cuatro soluciones mediante un solo modelo analítico, lo anterior utilizando la técnica de pozos imagen aplicada al modelo para fallas intersectantes. Posteriormente, se simplifica dicho modelo para los casos de yacimiento infinito, presencia de una falla y presencia de dos fallas paralelas.

Es importante señalar que, a partir de las pruebas de interferencia entre pozos, se puede obtener información que ayuda a la caracterización dinámica de los yacimientos y a mitigar parámetros de incertidumbre en los modelos de simulación o pronósticos de producción, los principales parámetros que se obtienen de estas pruebas son:

- 1) Verificar/Validar comunicación entre pozos
- 2) Presencia de límites cercanos a los pozos
- 3) Compresibilidad total del sistema roca-fluido de forma directa, es la única prueba de presión con la cual se puede obtenerla.
- 4) Identificación de heterogeneidades y direcciones preferenciales de flujo con varias pruebas de interferencia.
- 5) Definir la orientación de fallas al combinar las pruebas de interferencia con pruebas de presión producción de pozos cercanos.

Las pruebas de interferencia deben tener un diseño y programación con base al objetivo que se desee obtener, sin embargo, muchas veces estas pruebas se pueden originar de manera no programada durante el cierre, apertura, ampliaciones o estrangulamiento de los pozos, lo

cual puede ser registrado en pozos cercanos con sensores permanentes de fondo instalados.

Planteamiento del problema

En este trabajo se plantea la forma de obtener un modelo generalizado que incluya las diferentes pruebas de interferencia para un yacimiento infinito, yacimiento con presencia de una falla, yacimiento con presencia de dos fallas paralelas y yacimiento con presencia de dos fallas intersectantes, usando un solo modelo analítico que pueda simplificarse a cada una de las condiciones que se tengan en el yacimiento durante una prueba de interferencia particular, dicha solución también es planteada considerando un yacimiento naturalmente fracturado al considerar el coeficiente de capacidad de almacenamiento de las fracturas (ω) y el parámetro de flujo interporoso matriz-fractura (λ).

Metodología

Partiendo de la **Figura 1** donde se muestra la ubicación del pozo imagen respecto a los pozos Activo y Observador, para representar la presencia de una falla. Se puede establecer que la caída de presión en variables adimensionales estará definida por la suma de efectos medidos en el pozo observador (efecto del pozo Activo y efecto del pozo imagen), representado en la **Ec.1**.

$$p_{Dtotal} = p_{D\text{ pozo activo}} + p_{D\text{ pozo imagen}} \quad (1)$$

En el presente trabajo no se abordarán los detalles trigonométricos para los cálculos de las distancias entre los pozos Activo-Observador y los pozos imaginarios, ya que no es la parte fundamental del presente trabajo, sin embargo, en el programa de cálculo realizado para obtener las soluciones mostradas está considerado lo anterior. De igual manera, se considerará como base la solución fuente cilíndrica en el dominio de Laplace sin mostrar su deducción, para lo cual se puede consultar la referencia (Van Everdingen, A. and Hurst, W., 1949).

De esta manera, incluyendo en la Ec.1 la solución fuente cilíndrica en el dominio de Laplace considerando la solución para Yacimiento Naturalmente Fracturado, se obtiene la expresión mostrada en la **Ec.2**:

$$\bar{p}_{wD}(s) = \frac{K_0(r_D \sqrt{sf(s)})}{s \sqrt{sf(s)} K_1(\sqrt{sf(s)})} + \frac{K_0(L_{Di} \sqrt{sf(s)})}{s \sqrt{sf(s)} K_1(\sqrt{sf(s)})} \quad (2)$$

Donde;

- r_D ; Distancia adimensional entre el pozo activo y observador
- L_{Di} ; Distancia adimensional entre el pozo imagen y observador
- $f(s)$; Función de transferencia matriz-fractura $f(s) = \frac{\lambda+s\omega(1-\omega)}{\lambda+s(1-\omega)}$
- s ; Variable del dominio de Laplace
- λ ; Parámetro de flujo interporoso matriz-fractura
- ω ; Coeficiente de capacidad de almacenamiento de las fracturas

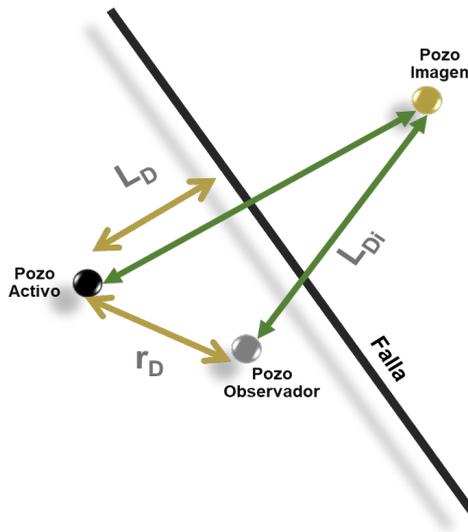


Figura 1. Ubicación de pozo imagen en prueba de interferencia ante una falla.

La Ec.2, puede generalizarse para casos más complejos donde existen dos fallas, ya sean paralelas o intersectantes en cualquier ángulo, cuyas soluciones requieren de “n” pozos imagen a diferentes distancias, para reproducir el comportamiento de presión correspondiente, representado de forma general en la Ec.3

$$\bar{p}_{wD}(s) = \frac{K_0(r_D\sqrt{sf(s)})}{s\sqrt{sf(s)}K_1(\sqrt{sf(s)})} + \sum_{i=1}^n \frac{K_0(L_{Di}\sqrt{sf(s)})}{s\sqrt{sf(s)}K_1(\sqrt{sf(s)})} \quad (3)$$

La Ec.3 será la ecuación generalizada de pruebas de interferencia, obtenida mediante la aplicación de la técnica de superposición en espacio, utilizando pozos imagen para representar las diferentes fronteras, donde el término “n” de la sumatoria representa el número de pozos imagen

requeridos para modelar la respuesta de presión de la frontera a analizar. La Ec.3 puede generalizarse considerando la Figura 2 para representar la ubicación de los pozos activo y observador respecto a las fallas.

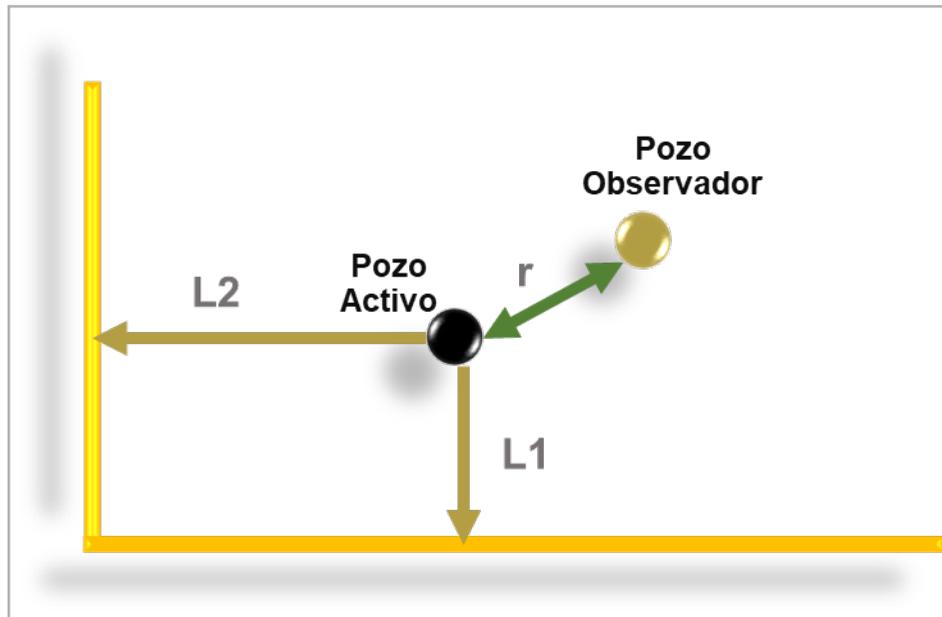


Figura 2. Esquema de ubicación de pozos para el modelo generalizado.

Resultados

A partir de la solución generalizada para pruebas de interferencia, Ec.3, se pueden obtener las soluciones de presión de los diferentes casos: Yacimiento infinito,

Presencia de una falla, Presencia de dos fallas paralelas y presencia de dos fallas intersectantes en cualquier ángulo, utilizando el algoritmo de inversión numérica de Stehfest.

Simplificación para una prueba de interferencia en un yacimiento infinito

Para el caso de un yacimiento infinito, se puede considerar el mismo modelo planteado para la generalización (Ec.3), donde si las distancias a ambas fallas son muy grandes, tendiendo a infinito ($L_1 = L_2 \Rightarrow \infty$), genera que todos los términos de la sumatoria de la Ec.3 sean despreciables, generando que se reduzca a la expresión mostrada en la Ec.4. La solución adimensional de la presión y su función derivada, aplicando el algoritmo de inversión de Stehfest, se muestran en la Figura 3. Donde esta solución es la solución de Theis al considerar un medio homogéneo, $f(s) = 1$.

$$\bar{p}_{wD}(s) = \frac{K_0(r_D \sqrt{sf(s)})}{s \sqrt{sf(s)} K_1(\sqrt{sf(s)})} \quad (4)$$

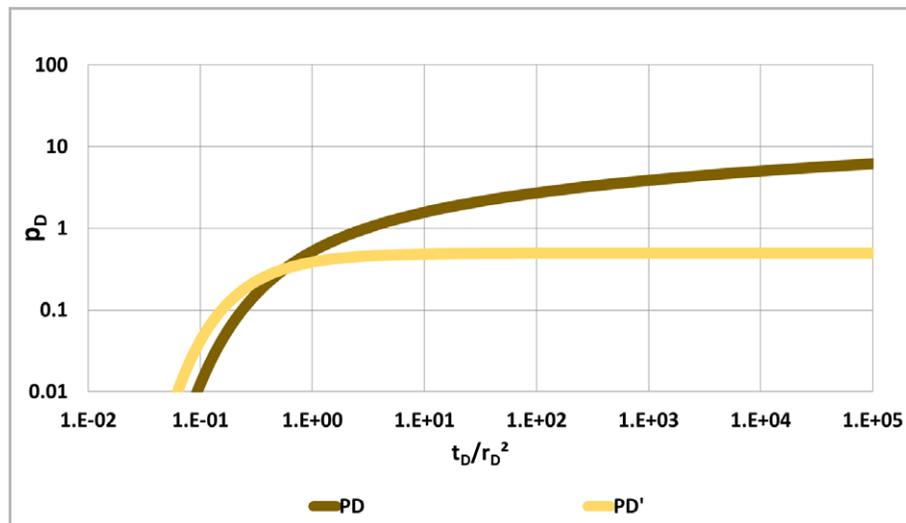


Figura 3. Solución adimensional para prueba de interferencia en un yacimiento infinito.

Simplificación para una prueba de interferencia en un yacimiento con una falla

Cuando existe una falla cercana a los pozos se puede representar considerando que L_1 o $L_2 \Rightarrow \infty$, con lo anterior la solución sólo quedará definida por un pozo imagen alejado 2 veces la distancia a la falla cercana, el término de la sumatoria de la Ec.3 se reducirá a un solo elemento, Ec.5.

$$\bar{p}_{wD}(s) = \frac{K_0(r_D\sqrt{sf(s)})}{s\sqrt{sf(s)}K_1(\sqrt{sf(s)})} + \frac{K_0(2L_D\sqrt{sf(s)})}{s\sqrt{sf(s)}K_1(\sqrt{sf(s)})} \quad (5)$$

La solución adimensional de la presión y su función derivada se muestran en la Figura 4. Mostrando un comportamiento característico de una respuesta de presión ante una falla sellante.

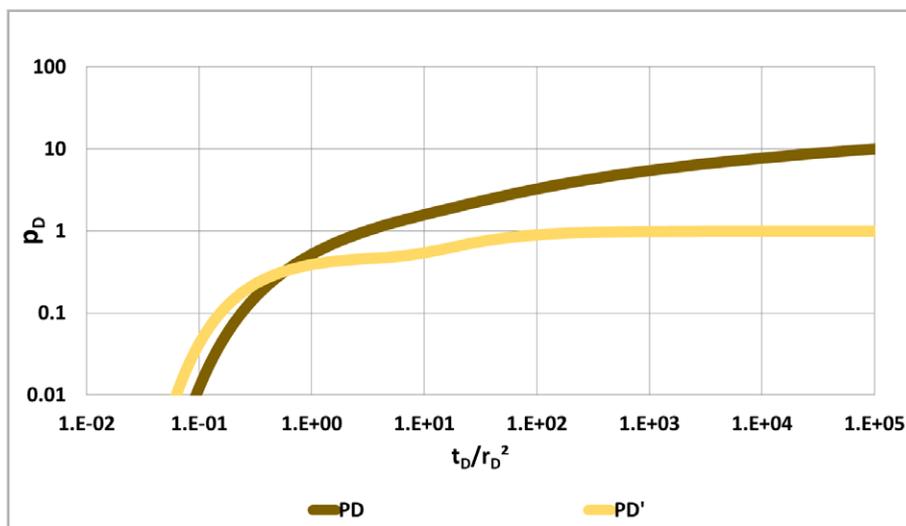


Figura 4. Solución adimensional para prueba de interferencia en yacimiento con una falla sellante.

A continuación, se muestra una sensibilidad del modelo propuesto a las variables de ω y λ , para mostrar el comportamiento esperado en una prueba de interferencia en un yacimiento naturalmente fracturado con la presencia de una falla sellante. En la **Figura 5** se muestra la sensibilidad al coeficiente de capacidad de almacenamiento de las

fracturas (ω) y en la **Figura 6** la sensibilidad al parámetro de flujo interporoso matriz-fractura (λ). Observando que el comportamiento de la doble porosidad se presenta a tiempos cortos y con un comportamiento característico de doble porosidad (Warren and Root, 1963).

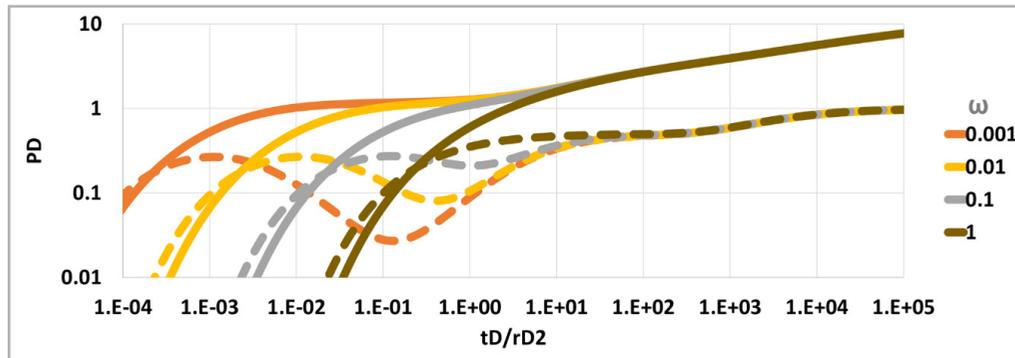


Figura 5. Sensibilidad al coeficiente de capacidad de almacenamiento de las fracturas (ω).

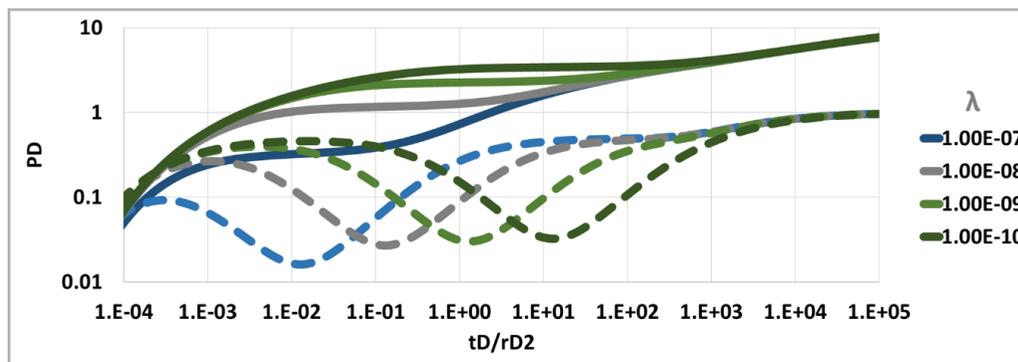


Figura 6. Sensibilidad al parámetro de flujo interporoso matriz-fractura (λ).

Simplificación para una prueba de interferencia en un yacimiento con dos fallas paralelas

Cuando existen dos fallas paralelas, la Ec.3, puede ser utilizada considerando que el ángulo de intersección tiende a cero, lo cual genera que en algún punto distante las fallas se comporten como paralelas, como se muestra en la **Figura 7**. Lo interesante de este planteamiento radica en que independientemente del tiempo de duración de la prueba, la solución queda definida por el efecto de 359 pozos imagen, tal como se muestra en la **Ec.6**.

$$\bar{p}_{wD}(s) = \frac{K_0(r_D\sqrt{sf(s)})}{s\sqrt{sf(s)}K_1(\sqrt{sf(s)})} + \sum_{i=1}^{359} \frac{K_0(L_{Di}\sqrt{sf(s)})}{s\sqrt{sf(s)}K_1(\sqrt{sf(s)})} \quad (6)$$



Figura 7. Planteamiento de ubicación de pozos para un yacimiento con dos fallas paralelas.

La solución adimensional de la presión y su función derivada se muestran en la **Figura 8**. Donde el comportamiento obedece a un flujo lineal con pendiente de $\frac{1}{2}$ en ambas curvas, en la caída de presión adimensional y su función derivada de presión.

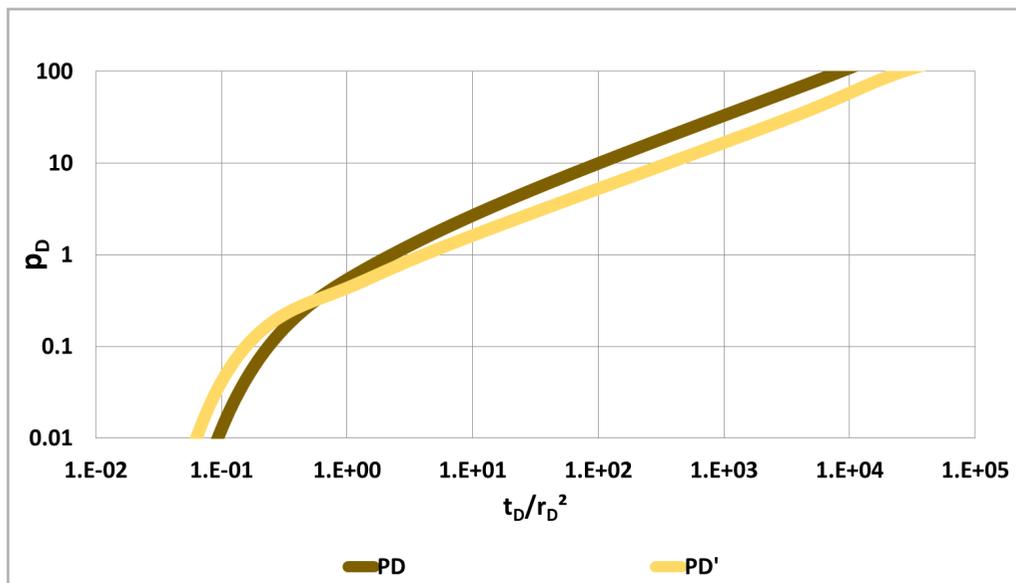


Figura 8. Solución adimensional para prueba de interferencia en yacimiento con fallas paralelas sellantes.

Simplificación para una prueba de interferencia en un yacimiento con dos fallas intersectantes

Para el modelo de yacimiento con fallas intersectantes, se aplica la Ec.3 evaluando el número de pozos imagen requeridos, “n”, dependiendo del ángulo de intersección de las fallas a través de la Ec.7. Como ejemplo, la solución adimensional de la presión y su función derivada para el caso de un ángulo de intersección de 45° se muestra en la **Figura 9**.

$$n = \frac{360^\circ}{\theta} - 1 \quad (7)$$

Con el modelo propuesto se pueden establecer las respuestas posibles para determinar si el pozo observador se encuentra alejado o cercano a la intersección de las fallas y con ello obtener una mejor caracterización dinámica,

como se muestra en la **Figura 10**, donde se observa que a tiempos cortos la ubicación del pozo observador influye en la respuesta, pero a tiempos largos la solución es idéntica.

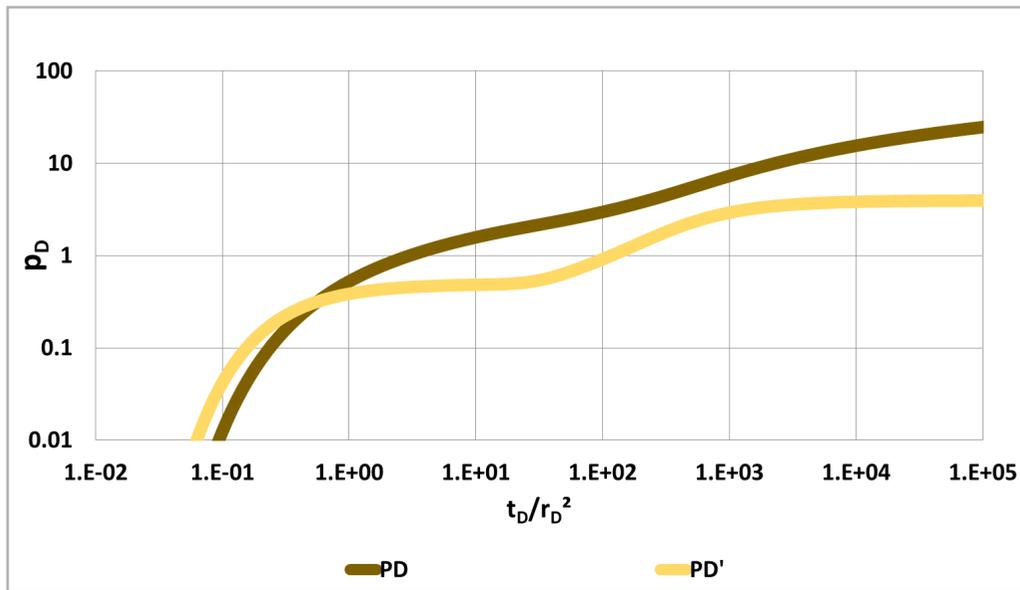


Figura 9. Solución adimensional para prueba de interferencia en yacimiento con fallas intersectantes sellantes en 45° .

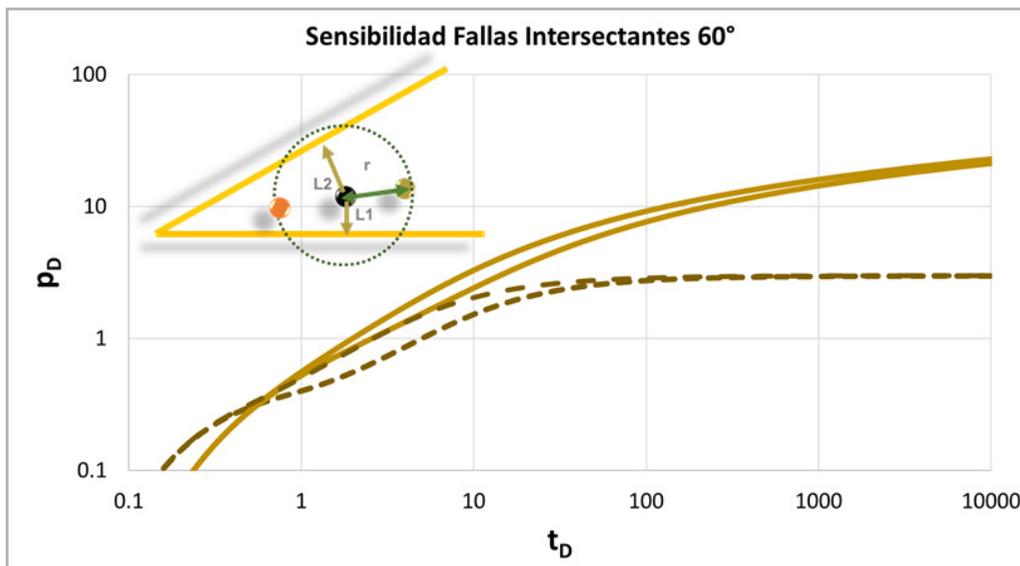


Figura 10. Solución adimensional para una prueba de interferencia en un yacimiento con fallas intersectantes sellantes en 45° .

Casos de campo

Se muestran dos ejemplos de campo para validar el modelo generalizado propuesto.

Ejemplo 1

En el primer ejemplo se tiene una respuesta característica de una presencia de falla sellante, logrando reproducir

la respuesta de los datos medidos durante una prueba de interferencia con duración de ~ 800 hrs, **Figura 11**. Obteniendo como resultados una $k=877$ md, $c_f=4.54 \times 10^{-5}$ psi $^{-1}$, una distancia a la falla de 1700 mts, los resultados son congruentes con el comportamiento del yacimiento y se validó la distancia a la falla a través de la información geológica, **Figura 12**.

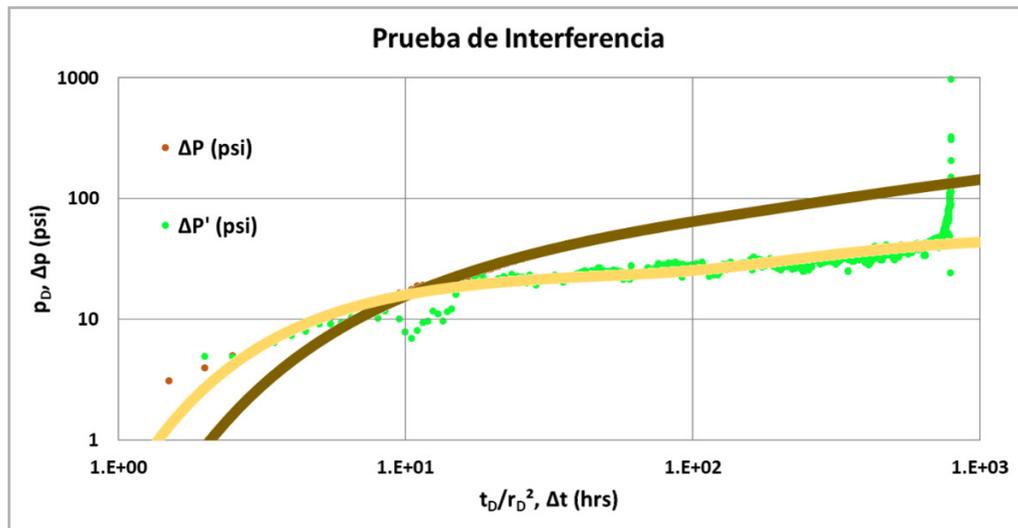


Figura 11. Prueba de interferencia ante una falla sellante.

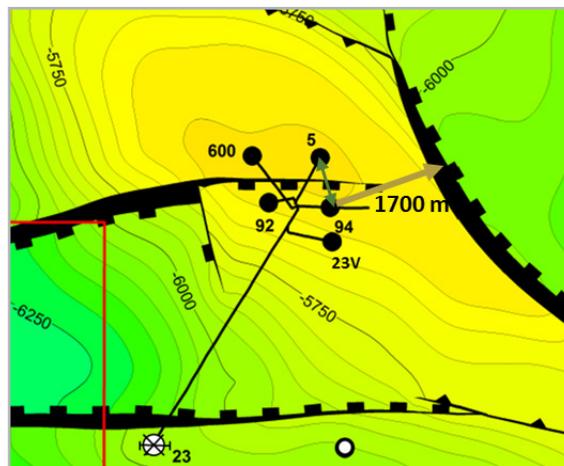


Figura 12. Validación de la distancia a la falla en la prueba de interferencia.

Ejemplo 2

Para el segundo ejemplo se tiene una respuesta de fallas sellantes intersectantes; con el modelo propuesto se logra reproducir la respuesta de los datos medidos durante una

prueba de interferencia con duración de ~ 180 hrs, **Figura 13**. Se obtuvieron los resultados siguientes: $k=7,485$ md, $c_t=1.28 \times 10^{-5}$ psi $^{-1}$, distancia a las fallas, $L_1=388$ m, $L_2=625$ mts, validadas con respecto a la información geológica-geofísica.

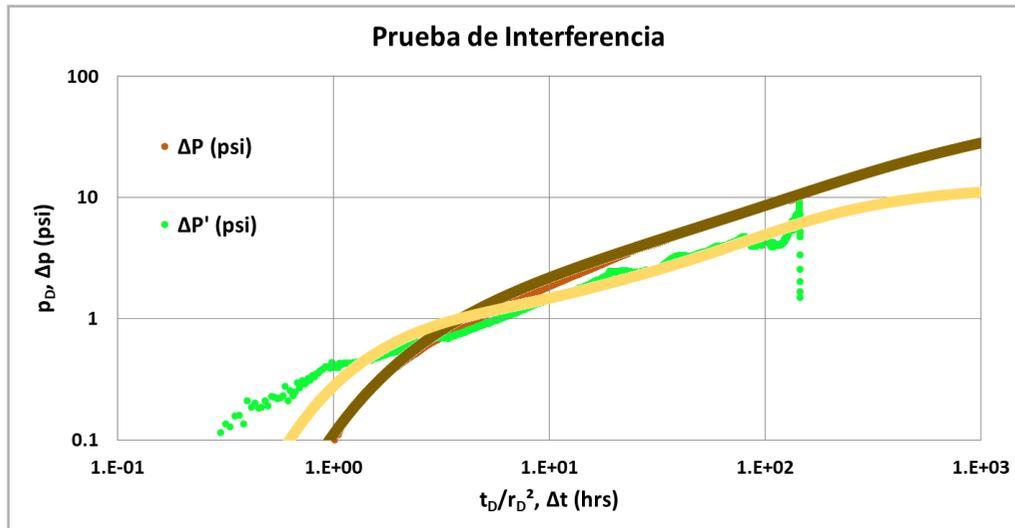


Figura 13. Prueba de interferencia ante dos fallas intersectantes.

Conclusiones

- Se ha presentado un modelo generalizado para la interpretación de pruebas de interferencia afectadas por fronteras en un Yacimiento Naturalmente Fracturado
- El modelo es capaz de identificar diferentes respuestas por la ubicación del pozo observador respecto al pozo activo, en la frontera de fallas intersectantes.
- La solución presentada es válida para una respuesta de fallas sellantes y de presión constante, o bien la combinación entre ellas
- Se logra reproducir pruebas de campo obteniendo resultados confiables, validados con el modelo geológico-geofísico.
- A partir del modelo generalizado se logran obtener los modelos simplificados para yacimiento infinito, una falla y fallas paralelas.

Nomenclatura

c_t	Compresibilidad total del sistema [psi-1]
$f(s)$	Función de transferencia matriz fractura en el espacio de Laplace
k	Permeabilidad [md]
$K_v(x)$	Función Bessel Modificada de segunda clase de orden v
L_{Di}	Distancia adimensional de los pozos imagen generados
n	Número de pozos imagen para modelar la frontera [adim]
p_D	Presión Adimensional [adim]
	Presión adimensional en el Pozo en el dominio de Laplace [adim]
r_D	Radio/Distancia adimensional [adim]
s	Variable de transformación al dominio de Laplace
t	Tiempo [hrs]

t_D	Tiempo adimensional [adim]
r_D	Distancia adimensional entre el pozo activo y observador
L_{Di}	Distancia adimensional entre el pozo imagen y observador
λ	Parámetro de flujo Interporoso matriz-fractura
ω	Coefficiente de capacidad de almacenamiento de las fracturas

Agradecimientos

Agradezco a mi empresa Pemex Exploración y Producción, por el apoyo que brinda para la preparación profesional y las facilidades para la implementación de nuevos desarrollos, específicamente a la Subdirección Técnica de Exploración y Producción y a la Gerencia de Planes de Explotación.

Referencias

Cinco-Ley, H. y Samaniego-V., F. 1982. Pressure Transient Analysis for Naturally Fractured Reservoirs. Artículo presentado en SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, EUA, septiembre 26-29. SPE-11026-MS. <https://doi.org/10.2118/11026-MS>.

Earlougher, R. J. 1977. *Advances in Well Test Analysis*, Vol. 5. Richardson, Texas, EUA: SPE Monograph Series, Society of Petroleum Engineers.

Najurieta, H., Durán, R., Samaniego-V., F. et al. Transmissivity and Diffusivity Mapping From Interference Test Data: A Field Example. *SPE Form Eval* **10** (03): 180–185. SPE-22701-PA. <https://doi.org/10.2118/22701-PA>.

Posadas Mondragón, R. 2015. *Comportamiento de la Presión en Pozos de Yacimientos Naturalmente Fracturados con Efectos de Fronteras Mediante Pozos Imagen*. Tesis de Maestría, UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería.

Stehfest, H. 1970. Algorithm 368: Numerical Inversion of Laplace Transforms [D5]. *Communications of the ACM* **13** (1): 47-49. <https://doi.org/10.1145/361953.361969>.

Van Everdingen, A. y Hurst, W. 1949. The Application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs. *J Pet Technol* **1** (12): 305-324. SPE-949305-G. <https://doi.org/10.2118/949305-G>.

Warren, J. E. y Root, P. J. 1963. The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs. *SPE J.* **3** (03): 245-255. SPE-426-PA.

Semblanza del autor

Ricardo Posadas Mondragón

Ingeniero Petrolero, egresado en el año 2004 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. En el año 2015 obtuvo el grado de Maestría en Ingeniería Petrolera en la misma institución en el Posgrado de Ingeniería.

Inició sus actividades profesionales en la compañía Halliburton en el año 2004, posteriormente, del año 2005 al 2015 se desempeñó en el área de Productividad de Pozos en el Activo de Producción Cantarell de PEMEX. Posteriormente como Coordinador del Centro de Estudios para la Región Marina Suroeste. Actualmente forma parte del Grupo Estratégico de la Dirección General de Pemex Exploración y Producción

Ha desempeñado labores de Docencia en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y en la Facultad de Química de la UNACAR, así como instructor interno de cursos de Pruebas de presión y Productividad de pozos en el Colegio de Ingenieros Petroleros de México, Sección Carmen.

Es autor de 16 artículos técnicos publicados en revistas nacionales e internacionales enfocados al ámbito de Caracterización Dinámica de Yacimientos y Productividad de Pozos.

En el año 2020 obtuvo el premio Lázaro Cárdenas otorgado por la AIPM por el mejor trabajo práctico en materia de ingeniería titulado “Solución Analítica de Pruebas de Presión en Pozos con Penetración Parcial en Yacimientos Naturalmente Fracturados con Geometría Fractal”.

Es miembro de la Asociación de Ingenieros Petroleros de México (AIPM), del Colegio de Ingenieros Petroleros de México (CIPM), de la SPE Sección México.