



**INTERNATIONAL TRAINING GROUP
TECHNICAL ASSISTANCES**

**ESP OIL INTERNATIONAL TRAINING GROUP
PRESENTA EL**

WorkShop International

Análisis de Pruebas de Presión

Dictado por:
PhD. Douglas Alvarado

**Del 06 al 10 de Septiembre de 2004
Instalaciones del Hotel Maruma
Maracaibo – Venezuela.**

ANÁLISIS MODERNO DE PRUEBA DE POZOS

CONTENIDO

CAPÍTULO 1: Introducción Reseña Histórica. Métodos Convencionales. Método de Curva Tipo. Aplicación del Método de Curva Tipo. Análisis de Pruebas de Buildup. Ecuación de Flujo. Yacimientos Fracturados. Nuevos Avances. Análisis Computarizado. Análisis Actual. Conclusiones.

CAPÍTULO 2: Análisis de Pruebas de Pozos. Objetivos. Aplicación del Análisis de Presiones. Bases Matemáticas para el Análisis de Pruebas de Presión. Solución de la Línea Fuente en su forma adimensional. Análisis semilog de una prueba de flujo (Drawdown). Solución a la ecuación de flujo radial para fluidos de compresibilidad constante.

CAPÍTULO 3: Prueba de Interferencia. Curva tipo de la solución de la Línea Fuente. Bases teóricas. Solución gráfica. Curva tipo doble presión y derivada. Método de El-Khatib. Caso de prueba de interferencia cuando se cierra el pozo activo luego de haber producido a tasa de flujo constante. Tratamiento de Ramey.

CAPÍTULO 4: Bases teóricas de las prueba de pozos. Principios de Superposición en espacio. Problema transformado. Superposición en Tiempo. Justificación del procedimiento empleado para aplicar el principio de superposición en tiempo. Prueba de doble tasa. Caso especial de la prueba de doble tasa. Método MDH. Método de Horner. Efecto de Llame. Efecto de Daño. Modelos para interpretar el Skin. Prueba de flujo para un pozo localizado cerca de una falla. Caso de Restauración de Presión de un pozo cerca de una falla. Aplicación del Principio de Superposición para modelar límites de área de drenaje cuadradas.

CAPÍTULO 5: Análisis de Drawdown en forma convencional. Prueba de restauración de presión en su forma convencional. Determinación de presión promedio del yacimiento al momento del cierre, usando pruebas del Buildup en yacimientos volumétricos. Método MBH. Método de Dietz. Método de Ramey y Cobb. Método de Muskat. Método de Arp y Smith.

CAPÍTULO 6: Generalización de Análisis de Pruebas de Pozos. Ecuación básica de pruebas de restauración de presión. Método de Muskat extendido. Método de Miller-Dyes-Hutchinson. Método de Horner.

CAPÍTULO 7: Revisión crítica de pruebas de presión para pozo en yacimientos de gas. Principios físicos. Prueba tipo convencional. Prueba isocronal. Pruebas transitorias.

CAPÍTULO 8: Método de curva tipo. Aproximaciones de la solución de Agarwal et al. Aplicación práctica del método del Curva Tipo. Curva tipo de Mc Kinley. Curva tipo de Earlougher y Kersch. Curva tipo de Gringarten et al. Tiempo de Agarwal. Método de la curva tipo doble de presión y derivada: Método de Bourdet et al. Procedimiento de aplicación de la Curva Tipo por el método de Gringarten y Bourdet.

CAPÍTULO 9: Análisis de pruebas de pozos. Comportamiento de yacimientos fracturados hidráulicamente. Teoría de flujo Transient. Curvas Tipo para fracturas sin efecto de daño y de llene. Métodos convencionales. Comienzo y final de Flujo Bilineal. Período de flujo lineal. Método modificado de Milheim-Cichowicz. Factor de daño y efecto de llene.

CAPÍTULO 10: Yacimiento naturalmente fracturados. Modelos convencionales. Modelo de Warren y Root. Método de análisis convencional para Buildup. Método

de solución usando Curvas Tipo. Modelo de flujo interporoso Transient. Procedimientos. Deducción de la ecuación de difusividad para yacimientos naturalmente fracturados.

Modelo de Bourdet y Gringarten. Modelo Transient . Tratamiento de la derivada. Derivada del modelo de Bourdet y Gringarten.

CAPÍTULO 11: Principio de Superposición en tiempo. Tasa de Flujo medida en la superficie. Analisis de tasa múltiple. Deconvolución. Métodos aplicados. Teoría de Convolución. Antecedente a la Teoría MLT. Características de la Prueba MLT. Pruebas de pozos para yacimientos multiestratos.

CAPÍTULO 12: Pozos horizontales. Modelos matemáticos. Modelo de Clonts y Ramey. Definición de variables adimensionales. Análisis de Curva Tipo. Extensión para pozos con múltiples hoyos de drenaje. Uso de las funciones Fuente y de Green para resolver problemas de flujo no continuo en yacimiento. Funciones instantáneas de Green y de Fuente. Método de Neumann. Método de Odeh y Babu. Modelo de Daviau, Mounronval, Bourdarot y Curutchet. Pozo horizontal en un yacimiento homogéneo con límites a presión constante. Modelo de Goode y Thambynayagam. Prueba de restauración de presión en yacimiento infinitos. Efecto Skin. Prueba de restauración en yacimientos finitos. Método de Ozkan y Raghavan. Método de Chow. Factor pseudo-skin. Teoría de Kuchuk, Goode, Brice, Sherrard y Thambynayagam.

CAPÍTULO 13: Consideraciones teóricas. Preparación de la data. Análisis de las pruebas. Metodología de análisis e interpretación. Carga de datos. Gráfico de diagnóstico. Regresión Lineal. Análisis de Curva Tipo. Regresión no- lineal. Validación de la prueba. Modelo de producción a tasa de flujo constante en

un yacimiento circular finito. Yacimiento multicapa. Commingled Nuevos Avances.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y RESEÑA HISTÓRICA

Los primeros elementos de medición de presiones registraban un solo punto de presión. Los instrumentos de medición continua de presión fueron introducidos en 1930.

El método de Recobro en Hidrología (análogo al método de Horner) fue introducido por Theis³ en 1935.

En 1937, Muskat⁴ presentó un método para determinar presión estática \bar{P} del área de drenaje en pozos petroleros, es un método semilog de ensayo y error.

En 1949, Van Everdingen y Hurst⁵, presentaron un estudio clásico de análisis de pruebas de pozos, y desarrollaron una solución al problema pozo-yacimiento con efecto de llene, e introdujeron la primera Curva Tipo.

Miller, Dyes y Hutchinson⁶, (MDH), presentaron en 1950, un método basado en soluciones presentadas por Van Everdingen y Hurst⁵, donde establecen que (p_{ws}) debía ser una función lineal del tiempo de cierre, $\log \Delta t$. Presentaron gráficos para determinar presión estática del yacimiento bajo condiciones de límite exterior cerrado y a presión constante e investigaron y propusieron un método para analizar presiones para flujo multifásico.

Horner⁷, en 1951 presentó un método para analizar pruebas de restauración de presión y determinó que un gráfico de la presión de fondo de cierre, p_{ws} , debía ser una función lineal del $\log (t+\Delta t)/\Delta t$. Horner⁷ identifica fallas geológicas y presenta el primer método para determinar presión estática del yacimiento, usando información del “transient”.

En 1953 Van Everdingen y Hurst^{8,9}, introducen el efecto de daño (S).

En 1955 Perrine¹⁰, presentó una revisión de los trabajos de Horner y MDH, y propuso un nuevo método para análisis de pruebas de presión para flujo multifásico. Más tarde Martin¹¹ estableció las bases teóricas para este método.

Matthews, Brons y Hazebroek¹² (MBH) presentaron en 1954 un estudio donde utilizaron el principio de superposición en espacio, para determinar el

comportamiento de presión de pozos localizados dentro de áreas de drenaje rectangular. Desarrollaron además un método para determinar presiones promedio de área de drenaje (\bar{p}) el cual hace uso de información Transient de presión y de la presión extrapolada, (p^*) de Horner. Este método es uno de los más utilizados actualmente para determinar

presión promedio del yacimiento.

Al-Hussainy, Ramey y Crawford¹³ introdujeron en 1966 el concepto de la función pseudo presión, $m(p)$, para gases la introducción de esta función removió la suposición de que los gradientes de presión tenían que ser pequeños para obtener una ecuación de flujo de gas en yacimientos, definió condiciones de aplicabilidad de estudios presentados anteriormente y extendió la teoría de análisis de pruebas de presión de líquidos a gases utilizando la función $m(p)$.

En 1968, Earlongler, Ramey, Miller y Mueller, aplicaron el principio de Superposición en espacio para obtener la solución del problema de un pozo produciendo a tasa de flujo constante, localizado en diferentes posiciones dentro de un área de drenaje rectangular.

Mostraron como usar el problema de un pozo en el centro de un cuadrado para general soluciones para áreas de drenaje rectangular.

En 1970 Agarwal, Al-Hussainy y Ramey¹⁴ introdujeron el análisis de los períodos iniciales de flujo o restauración de presión mediante el Método de la Curva Tipo, para un pozo localizado en un yacimiento infinito con efecto de llene y efecto de daño. En el método de Curva Tipo, el problema pozo-yacimiento se formula matemáticamente de acuerdo a las leyes físicas del flujo de fluido en medios porosos y aplicando determinadas condiciones iniciales y de contorno. Las ecuaciones resultantes se resuelven mediante métodos del análisis clásico matemático (transformación de Laplace, funciones de Green, etc.) o mediante técnicas del análisis numérico (diferencias finitas, elementos finitos); luego, la solución se dibuja en un papel (Curva Tipo) y se trata de ajustar los datos reales dibujados en un papel semi-transparente (Gráfico de Campo) a la solución teórica.

McKinley¹⁵ en 1971 y Earlougher y Kersch¹⁶ en 1974 también han presentado modelos de Curva Tipo para el problema del pozo con efecto de llene y de daño.

El modelo de Mc Kinley¹⁵ fue desarrollado para pruebas de restauración de presión y es un modelo que utiliza diferencias finitas. Fue desarrollado para un valor determinado de la constante de difusividad y para condiciones de contorno de presión constante en el límite exterior. Tal como fue formulado originalmente, no permite un análisis cuantitativo del efecto de daño. La idea de que todas las curvas convergen a tiempos muy pequeños a una sola curva va a usarse posteriormente en Curvas Tipos más modernas (Gringarten, et al.¹⁷, Bourdet, et al.¹⁸). Una de las principales ventajas de la Curva Tipo de Earlougher y Kersch¹⁶ es haber reducido los parámetros de las curvas a uno solo: $C_D e^{2S}$, este tratamiento va a ser usado posteriormente en las Curvas Tipo más modernas.

PhD. Douglas Alvarado

En 1979 Gringarten et al.¹⁷ introducen una Curva Tipo para yacimientos homogéneos con condición de contorno interior en el pozo de efecto de llene y efecto de daño y para yacimientos de fractura inducida. Matemáticamente Gringarten et al.¹⁷ modificaron la solución de Agarwal et al. en el campo de Laplace e invirtieron esta solución usando el algoritmo de Sthefest. Tradicionalmente se utilizaban métodos clásicos del análisis matemático para determinar la transformada inversa (formula de Mellin). La solución de Gringarten et al.¹⁷, es una solución mas completa y elaborada. Algunos puntos resaltantes de esta solución son los siguientes:

La solución, p_{wFD} , es una función de $\frac{t_D}{C_D}$ y del parámetro $C_D e^{2S}$.

1. En la Curva Tipo se indican límites de duración del efecto de llene para cada valor de $C_D e^{2S}$
2. Se determinan formas cualitativas y valores cuantitativos típicos de las curvas de presión adimensional, p_{wFD} , contra tiempo adimensional, t_D/C_D , y de acuerdo al valor del parámetro $C_D e^{2S}$ (gráfico log-log) para pozos dañados, no dañados, estimulados y fracturados.
3. Determina sobre la Curva Tipo, el lugar geométrico del comienzo de la línea recta semilog, e incluyen una escala para cerciorarse de que el tiempo de flujo
4. antes de una prueba de "Buildup" es correcto para analizar las presiones a determinados tiempos de cierre, con la curva Tipo de flujo.

Bourdet et al.¹⁸ en 1982, introducen el método de la derivada para análisis de presiones. El problema de las Curvas Tipo, anteriormente mencionadas, consistía en respuesta no única Bourdet et al.¹⁸, aun cuando presentan una Curva Tipo de flujo, compuesta de dos familias de curvas de parámetros $C_D e^{2S}$, esto es: la Curva Tipo log-log de Gringarten et al. y la derivada de la Curva de Tipo de Gringarten et al. multiplicada por (t_D/C_D) , presentan técnicas computacionales para tratar las pruebas de flujo y las pruebas de restauración de presión en forma separada; de tal forma que la derivada en el "drawdown" y en pruebas de restauración de presión representan derivadas con respecto al $\ln t_D$ y al $\ln(t_D + \Delta t_D)/\Delta t_D$, respectivamente. Este método conjuntamente con la información geológica, geofísica, de registros, etc., constituye la técnica más importante de diagnóstico en el análisis de interpretación de pruebas de pozos. Se han presentado bibliotecas de respuestas típicas basadas en presiones y fundamentalmente en la derivada de presión que permiten identificar el sistema pozo-yacimiento bajo análisis y en base a ciertos comportamientos

PhD. Douglas Alvarado

típicos registrados por la derivada de presión.

Las técnicas de medición de presión se mejoraron notablemente con la introducción del medidor electrónico de presión en 1970¹⁹. El medidor electrónico es de mejor precisión y resolución que los medidores mecánicos tipo Amerada que utilizan el tubo Bourdon; de tal forma, que las mediciones se pueden efectuar a intervalos de pocos segundos, permitiendo tomar hasta decenas de miles de puntos que van a contribuir a identificar el sistema pozo-yacimiento durante el proceso de análisis e interpretación de la prueba.

Nuevas técnicas del análisis matemático y nuevas aplicaciones numéricas (funciones de Green, Algoritmos de Sthefest, diferencias finitas, elementos finitos) han permitido obtener soluciones particulares del problema general, con valor en el contorno del sistema pozo-yacimiento, entre ellos citaremos: solución al problema de fractura de conductividad infinita²⁰, problema del pozo de

conductividad finita²¹, modelo de pozo multiestrato²², solución al problema de pozos horizontales^{23,24}.

Los avances en "Hardware" para instrumentos de medición y registro de presiones in situ junto al pozo, la introducción de las computadoras personales de gran capacidad de memoria y velocidad de procesamiento de datos y de cálculos, hizo accesible al ingeniero programas y métodos de análisis reservados solamente para grandes computadoras y que podían aplicarse durante el desarrollo de las pruebas en sitio.

A partir de inicios de la década pasada (1983)^{25,26} se comienza a efectuar mediciones simultáneas de presión y tasa de flujo durante la etapa "transient". Esto promete ser un campo de intensa investigación tecnológica en cuanto al desarrollo de instrumentos de medición y técnicas de análisis, mediante el uso de Convolución y Deconvolución. De un análisis independiente en los años 50 cuando solo se aplicaban los métodos convencionales de análisis, se ha pasado progresivamente a un análisis integrado sinérgico, en donde la información geológica, geofísica, petrofísica, de registros de pozos, de datos de completación, tipos de pozos, datos de PVT, etc. aportan su cuota de descripción y de información para obtener el modelo final que caracteriza al sistema pozo-yacimiento.

MÉTODOS CONVENCIONALES

Los métodos convencionales se refieren aquellos métodos descritos en la literatura en los años 50 esto es: Los métodos de Horner⁷, MDH⁶, Muskat⁴ y MBH¹². Estos métodos

PhD. Douglas Alvarado

utilizan en general los tiempos de cierre “transient” (Horner, MDH, MBH) o los tiempos de cierre afectados por los límites, como el método de Muskat⁴ de ensayo y error, para determinar presión estática del área de drenaje, \bar{p} . Los métodos de Horner⁷ y MDH⁶, no toman en cuenta en el análisis las primeras presiones recogidas en el pozo y solo son válidos para analizar una prueba si se puede obtener la línea recta semilog apropiada en un gráfico de p_{ws} contra $(t+\Delta t)/\Delta t$. Muchas veces es difícil obtener la línea recta

correcta. Un gráfico semilog puede mostrar varias líneas rectas, a diferentes tiempos de la prueba, y el problema sería determinar la recta semilog apropiada. Por ejemplo, un pozo dañado con efecto de llene alto puede hacer desaparecer por largo tiempo de cierre la línea recta semilog. Así mismo, un pozo fracturado, se comporta en una forma característica (pendiente $\frac{1}{2}$ en papel log-log) pero no sigue a cortos tiempos la línea recta semilog. No fue sino hasta 1970 cuando se introdujo la Curva Tipo de Agarwal et al.¹⁴, que tomaba en cuenta y utilizaba los primeros tiempos de flujo o de cierre, y de cuyo análisis podría inferirse la naturaleza del sistema pozo-yacimiento y los valores numéricos de las variables desconocidas o parámetros. Esto lo discutiremos en la próxima sección.

MÉTODOS DE CURVA TIPO

En general, una Curva Tipo es una solución a un problema con valor en el contorno relacionando, generalmente variables en forma adimensional, graficadas en un papel de características determinadas, normalmente log-log.

En 1970 Agarwal et al.¹⁴ introducen una Curva Tipo para el modelo de pozo produciendo a tasa de flujo constante, con efecto de llene, C_D , y efecto de daño, S . Casi al mismo tiempo se presentaron las Curvas Tipos de McKinley¹⁵ y de Earlougher y Kersch¹⁶. Durante la mayor parte de la década del 70 se usaron estas Curvas obteniéndose normalmente respuestas diferentes para un determinado problema. Sin embargo, se sugería el uso del método semilogarítmico para pruebas de flujo, y del método de Horner para pruebas de restauración de presión con el objeto de comparar y verificar respuestas numéricas². En esa década no se había generalizado el uso de computadora para hacer el análisis, no se hacía un análisis integrado con información proveniente de diversas fuentes de información y de ingeniería, y normalmente se utilizaba medidores de presión mecánicos. Las Curvas Tipo de Agarwal et al.¹⁴, desarrolladas para pruebas de flujo, se utilizaban también para analizar pruebas de restauración de presión usando una

justificación dada por Agarwal et al.¹⁴. Sin embargo, no se verificaba durante la prueba la influencia del tiempo de producción, especialmente cuando este es pequeño durante el análisis de la prueba.

La Curva tipo de Gringarten et al.¹⁷ introducida en 1979, representa un paso muy importante dentro del análisis de pruebas de pozos. Por primera vez se presentaba una Curva tipo con indicación del final del efecto de llene, el comienzo de la línea recta semilog y cualitativamente, y cuantitativamente se podía obtener indicación sobre la condición del pozo. El problema de unicidad en la solución seguía presente y los mismos autores recomendaban efectuar el análisis conjuntamente con el método semilog o el método de Horner⁷.

Una de las técnicas más importantes del análisis de las pruebas de presiones fue introducida por Bourdet et al.¹⁸, el método de la derivada, (1983). Este método toma particularmente ventaja de la gran sensibilidad de la derivada para detectar características y comportamiento característico del sistema pozo-yacimiento, la obtención de la derivada con respecto al $\ln t_D$ o $\ln(t_D + \Delta t_D)/\Delta t_D$ representa la pendiente del método semilog. La mayoría de las técnicas de diagnóstico actuales están basadas en el método de la derivada. Esto permite hacer un ajuste de presión más preciso y efectuar con más confiabilidad el análisis y la interpretación de la prueba de presión.

Una de las debilidades del Método de la Curva Tipo que incluyen al efecto de llene, es que consideran a este constante. Mediciones experimentales^{25,26} soportan la conclusión de que el coeficiente de efecto de llene no es constante en general. Sin embargo, no ha aparecido en la literatura una forma directa para reconocer cuando una prueba en un sistema pozo-yacimiento específico produce a efecto de llene constante o no. Muchas soluciones para problemas con valor en el contorno ("boundary value problem") diferentes al problema clásico de pozo con efecto de daño y llene han aparecido en la literatura.

Durante la década pasada se desarrollaron los modelos de doble porosidad^{27,28}, doble permeabilidad^{27,28}, yacimiento de fractura de conductividad infinita²⁰, fracturas de conductividad finita²¹, penetración parcial^{27,28}, pozos horizontales^{23,24}. Además, se introdujeron las mediciones simultáneas de tasa de flujo y presión que permitió el uso de los métodos de Convolución y de Deconvolución. Este tratamiento permite hacer el análisis de pruebas de pozos afectados con efecto de llene, removiendo la suposición de efecto de llene constante. En la actualidad el analista dispone de una biblioteca de Curvas Tipos con características específicas para numerosos problemas con valor en el Contorno.

PhD. Douglas Alvarado

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CURVA TIPO.

Ecuación de Flujo

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} = \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (1-1)$$

Condiciones de Contorno Internas

$$C_D \frac{dp_{wfD}}{dt_D} - \left(r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} = 1 \quad (1-2)$$

$$\frac{2\pi kh}{q\mu} (p_i - p_{wf}) = \left[p_D - S r_D \left(\frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right) \right]_{r_D=1} \quad (1-3)$$

Condición de Contorno Exterior

$$p_D (r_D, t_D) = 0 \quad (1-4)$$

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty}$$

Condición Inicial

$$p (r_D, t_D) = 0 \quad \text{para } t_D = 0 \quad (1-5)$$

Análisis de pruebas de “buildup” con la Curva Tipo:

Para “Drawdown”:

$$\frac{kh}{141.2qB\mu} (p_i - p_{wf}) = p_D \left(\frac{t_D}{C_D} \right) \quad (1-6)$$

graficamos : $(p_i - p_{wf} \text{ vs } t)$

Para “Buildup”:

$$\frac{kh}{141.2qB\mu} (p_i - p_{ws}) = p_D \left(\frac{tp_D}{C_D} + \frac{\Delta t_D}{C_D} \right) - p_D \left(\frac{\Delta t_D}{C_D} \right) \quad (1-7)$$

ecuación para una prueba de restauración (Buildup) en el momento de cerrar el pozo:

$$\frac{kh}{141.2qB\mu}(p_i - p_{wf}) = p_D \left(\frac{tp_D}{C_D} \right) \quad (1-8)$$

restando miembro a miembro la ecuación (1-8) menos la ecuación (1-7), obtenemos:

$$\frac{kh}{141.2qB\mu}(p_{ws} - p_{wf}) = p_D \left(\frac{\Delta t_D}{C_D} \right) + p_D \left(\frac{tp_D}{C_D} \right) - p_D \left(\frac{tp_D}{C_D} + \frac{\Delta t_D}{C_D} \right) \quad (1-9)$$

¿que sucede si?

$$p_D \left(\frac{tp_D}{C_D} \right) - p_D \left(\frac{tp_D}{C_D} + \frac{\Delta t_D}{C_D} \right) \approx 0 \quad (1-10)$$

Entonces la ecuación (1-9). Puede escribirse en forma análoga a la ecuación (1-6), es decir:

$$p_{DBU} = \frac{kh}{141.2qB\mu}(p_{ws} - p_{wf}) = p_D \left(\frac{\Delta t_D}{C_D} \right) \quad (1-11)$$

La prueba de "Buildup" podría analizarse con la curva tipo de "Drawdown" pero debe graficarse:

$p_{ws} - p_{wf}$ vs Δt

¿Cuándo se cumple la ecuación (1-10)?

1. Cuando $t_p \gg t$.
2. Para pozos dañados.
3. Dado u t_p , cuando Δt es relativamente pequeña y hasta un Δt , tal que se cumpla la ecuación (1-10).

p_{wfD} es función de t_D/C_D y el parámetro es $C_D e^{2S}$.

Se indica en la curva tipo límite de duración del efecto de llene puro como función de Curva Tipo de Gringarten et al. del parámetro $C_D e^{2S}$, se establecen formas cualitativas y valores cuantitativos para pozos dañados, no - dañados, estimulados y fracturados del parámetro $C_D e^{2S}$, y se determina el lugar geométrico del comienzo de la línea recta semi-log.

PhD. Douglas Alvarado

Se incluye una escala de determinación de validez de tiempo de cierre, Δt , para usar la Curva de Tipo de (“Drawdown”), para analizar pruebas de restauración de presión.

El método de la derivada de la Curva Tipo Bourdet et al¹⁸. (1983), reduce considerablemente el problema de la unicidad de la solución.

Es una curva de doble cotejo del parámetro $C_D e^{2S}$. Para la familia de curvas de presión y derivadas, presenta técnicas de computación diferentes para las pruebas de restauración de presión:

“Drawdown”, derivada con respecto a $\ln t$.

“Buildup”, derivada con respecto a $\ln (t + \Delta t) / \Delta t$.

Este el método Standard, base del análisis actual de pruebas de presión.

SOLUCIÓN “TRANSIENT”.

Kuchuk y Ayestaran²⁶ (1983) y Meunier, Wittmann y Stewart²⁵ (1985), introdujeron el análisis y la técnica de medición simultánea de presión y tasa de flujo durante el período “transient” de una prueba de presión.

Los datos de presión y de flujo se analizan usando Convolución y Deconvolución

Esta técnica promete ser un campo intenso de investigación durante los próximos años.

OTRAS SOLUCIONES:

Muchas soluciones diferentes al problema clásico del pozo con efecto de llene y “Skin” han aparecido en la literatura; por ejemplo:

Para Yacimiento Naturalmente Fracturados.

Warren y Root³⁴ (1963).

Mavor y Cinco⁴² (1979).

Bourdet y Gringarten³⁵ (1980)

De Swaan³³ (1976).

Bourdet et al³⁰. (Mayo 1983)

Bourdet et al³⁰. (Octubre 1983).

Para Yacimientos Hidráulicamente Fracturados.

Russell y Truit ⁴³ (1964).
Gringarten, Ramey y Raghavan²⁰ (1975).
Cinco, Samaniego y Dominguez³² (1978).
Agarwal, Carter y Poolen ³⁶ (1979).
Cinco y Samaniego³⁷ (1981).

Para Pozos Horizontales

Clonts y Ramey ³⁸ (1986).
Ozkan, Raghavan y Joshi ³⁹ (1989).
Goode y Thambynayagam ⁴⁰ (1987).
Odeh y Babu ⁴¹ (1990).

NUEVOS AVANCES:

Equipos y Herramientas de Medición

- * Medidor electrónico de presión (1970).
- * Registro de presión en la superficie.
- * Medición simultánea de presión y tasa de flujo (1983).
- * Mediciones de nivel de líquido mediante onda de sonido.

Computadoras

- * "Hardware". Computadoras personales PC Notebook, Handbook.
- * "Software". Programas computacionales para análisis e interpretación de pruebas de pozo.

Matemáticas y Análisis Numérico

Transformación de Laplace.

Funciones fuentes y funciones de Green (Gringarten⁴⁸ , 1973).

Series de Fourier.

Diferencias finitas.

Algoritmo de Sthefest ⁴⁵ (1970).

Azari - Wooden - Gaver (algoritmo AWG, Wooden, Azari y Soliman, OGJ 1992).

Programa de regresión no - lineal, mínimos cuadrados:

Levenberg (1944), Marquard (1963).

Rosa y Horner ⁴⁴ (1983).

PhD. Douglas Alvarado

Vieira y Rosa ⁵⁷ (1993).

Inteligencia Artificial, Mcvay et al. ⁵⁸ (1988).

Aplicación de Redes Neuronales , AI - Kaabi y Lee ⁴⁹ (1990).

Análisis Computarizado

Un programa de análisis e interpretación de pruebas de pozo debe tener los siguientes modelos integrados:

1. Un acceso de lectura, análisis, muestreo y ayuda visuales para representar los datos.
2. Un modelo de regresión lineal , para determinar k , m , ω , λ , C , p^* , S de los métodos semilog (pruebas de flujo y de restauración de presión) y del análisis log - log , análisis cartesiano , gráfico de p_{ws} vs \sqrt{t} , etc. (análisis especializado).
3. Un modelo de solución por Curva Tipo, debe disponer de una biblioteca o archivos de modelos. El modelo trabaja en la forma tradicional de ajuste por Curva Tipo, u opcionalmente, basado en el modelo seleccionado para generar curvas de respuestas de presión, usando las Curvas Tipo (solución al problema) y tomando como valores de los parámetros incógnitas aquellos obtenidos de 2. Debe tener la opción para modificar los valores de los parámetros y de una representación gráfica de comparación con la prueba de campo.
4. Un modelo de regresión no - lineal que incluya un análisis estadístico de la bondad de ajuste (intervalos de Confianza).
5. Un modelo de verificación y simulación de la prueba.
6. Un modelo de salida o reporte de resultados en forma gráfica y tabulada.

Entre los precursores de estos nuevos avances, se mencionan:

Pioneros:

Jargon y van Poolen ⁵² (1965).

Jahns ⁵¹ (1966).

Coats et al. ⁵⁰ (1970).

Earlougher y Kersch ⁴⁶(1972).

Modernos :

Padmanabhan ⁴⁷ (1976).

Rosa y Horner ⁴⁴ (1983).

Horner, Perrine y Barua ⁵³ (1986).

ANÁLISIS ACTUAL

El método de la Curva Tipo en forma manual ya casi no se usa, ante el advenimiento del computador, como instrumento de rutina en el análisis de pruebas de pozos. Las variedades limitantes del cálculo manual, incluyen cálculo lento y poco preciso durante el procesamiento de las varias etapas de análisis, especialmente durante la verificación y simulación de la prueba, hacen que el método manual tienda a desaparecer. Las mismas operaciones y cálculos pueden ser efectuadas por el programa de análisis, a mucha mejor precisión y en un tiempo relativo mínimo.

Método análisis actual incluye:

1. Uso de programa comercial de análisis de presiones.

2. El uso de regresión lineal manual y la aplicación del método de Curva Tipo tradicional manual pueden introducir errores apreciables en el análisis e interpretación de pruebas de presión.
3. Desde el punto de vista matemático el objetivo sigue siendo resolver un problema con valor frontera ("Boundary Value Problem"). Una vez obtenida la solución, analizarla, determinar períodos de flujo (análisis específico). Estudiarla (problema de unicidad de la solución) y en la práctica resolver el problema inverso.

4. La aplicación del cálculo manual, esta en desuso. Cálculo lento y poco preciso y la introducción del computador, PC han hecho casi desaparecer el análisis manual. En especial durante la simulación y verificación de la prueba. El método manual consume mucho tiempo.
5. Sin embargo, debido a las limitaciones en cuanto a número de soluciones (modelos matemáticos) de los programas comerciales, siempre es necesario una buena preparación ("background"), para poder efectuar el análisis e interpretación de la pruebas de pozos.
6. Se debe utilizar toda la información del sistema pozo - yacimiento disponible :
 - Historia de producción y de pruebas.
 - Datos de completación del pozo.

PhD. Douglas Alvarado

- Datos de PVT.
- Datos e información de geología.
- Datos de geofísica.
- Información de registro de formación.
- Datos petrofísicos.

7. Es recomendable el uso de Convolución y Deconvolución, cuando el efecto de llene no sea constante. Esta es la principal limitación de las curvas tipos desarrolladas hasta ahora ($C_D = \text{constante}$).

8. Muchas veces, aun con información del sistema conocido y la aplicación de programas comerciales, se presentan resultados ambiguos en el análisis e interpretación de la prueba, y sólo la aplicación de un análisis integrado, podría reducir o eliminar el problema de unicidad de la solución e identificar aproximadamente el modelo pozo-yacimiento, conocida la solución al problema, $p = p(t)$ (problema inverso).

9. El uso de herramientas de cierre en el fondo del pozo ha permitido usar el modelo de Curva Tipo, de coeficiente de llene constante, en forma bastante aceptable.

10. Los sistemas expertos y las redes neurales, es unos de los campos de investigación más recientes en el análisis e interpretación de pruebas de pozos.

Algunos métodos:

- Método estadístico de Watson et al.⁶⁰ (1988)
- Método basado en reglas de Allain y Horne⁵⁹ (1990)
- Redes neuronales de Al - Kaabi y Lee,⁴⁹ (1990)

La primera aplicación de estos métodos es la identificación del sistema pozo-yacimiento (solución del problema inverso).

CONCLUSIONES

1. El uso de la computadora y de programas especializados es indispensable y necesario en el análisis e interpretación de pruebas de presión.
2. Es muy importante la preparación técnica y académica del usuario, durante la toma de decisiones en el análisis e interpretación de pruebas de presión.
3. Para la determinación del modelo matemático se hace necesario un análisis integrado

PhD. Douglas Alvarado

de diversas áreas de ingeniería: geología, geofísica, registros de formación, propiedades PVT, etc.

4. Análisis log - log y análisis de diagnóstico, se puede determinar k , m , C , ω , λ etc., mediante análisis especializado de regresión lineal, identificando condiciones de contorno, tanto en el pozo como en los límites del yacimiento. Los métodos de análisis rutinarios consisten en:

* Análisis semi - log: Regresión lineal para determinar k , m , S , ω , λ del gráfico de Horner⁷, gráfico de la aproximación logarítmica de la Línea Fuente, gráfico de Warren y Root³⁴, etc.

- Análisis de Curva Tipo Bourdet et al¹⁸.
- Análisis de límites
- Prueba límite
- Regresión no - lineal
- Validación, verificación y comparación del modelo identificado con otros modelos (modelo geológico, petrofísico, etc.).

5. Nuevos avances en modelaje del sistema pozo - yacimiento, en técnicas de análisis y en desarrollo de instrumentos de mediciones de presiones y tasa de flujo, se esperan en un futuro cercano.

REFERENCIAS

CAPÍTULO 1

1. Carter, D.V.: History of Petroleum Engineering, A.P, Dallas (1961).
2. Ramey H. J., Jr.: Pressure Transient Testing, Distinguished Author Series, J. P. T. (Julio, 1982) 1407 - 1413.

3. Theis, C.V.: "The relation ship Between the Lowering of the Piezometric Surface and the rate and Duration of Discharge Using Ground-Water Storage", Trans. AIME (Aug. 1935) 519.
4. Muskat, M.: "Use of Data on the Buildup of Bottom-Hole Pressures," Trans., AIME (1947) 123, 44-48.
5. Van Everdingen, A.F., y Hurst, W.: "The application of the Laplace Transformation to Flow Problems Reservoirs", Trans. AIME (1949) 186,305.
6. Miller, C.C., Dyes, A.B. y Hutchinson, C.A., Jr.: "The Estimation of Permeability and Reservoirs Pressure from Bottom-Hole Pressure Build-up Characteristics", Trans AIME (1950)189,91.
7. Horner, D.R.: "Pressure Build-up in Wells", Pro.Tercer Congreso Mundial de Petróleo, E.J. Brill, Leiden (1951) 11,503.
8. Van Everdingen, A.F.: "The Skin Effect and its Influence on the Productive Capacity of a Well," Trans. AIME (1953) 198,171.
9. Hurst, W.: "Establishment of the Skin Effect and its Impediment to Fluid Flow into a Wellbore," Pet. Eng. (Oct., 1953) 25.
10. Perrine, R.L.: "Analysis of Pressure Buildup Curves, Drill. and Prod. Prac., API (1956)482-509.
11. Martin, J.C.: "Simplified Equations of Flow in Gas Drive Reservoirs and the Theoretical Foundation of Multiphase Pressure Buildup Analysis, "Trans. AIME (1959) Vol. 216, 309-311.
12. Matthews, C.S., Brons, F., y Hazebroek, P.: "A Method for Determination of Average Pressure in a Bounded Reservoir", Trans. AIME (1954) 201, 182.

13. Al-Hussainy, R., Ramey, H.J., Jr. y Crawford, P.B.: "The Flow of Real gases Through Porous Media," J. P.T. (Mayo, 1966) 624.
14. Agarwal, R.G., Al-Hussainy, R. y Ramey, H.J., Jr.: "An Investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow. I: Analytical Treatment," Soc. Pet. Eng. J. (Sept., 1970) 279.
15. McKinley, R.M.: "Wellbore Transmissibility from After flow-Dominated Pressure Buildup Data," J. P.T. (Julio, 1971) 863.
16. Earlougher, R.C., Jr. y Kersch, K.M.: "Analysis of Short - Time Transient Test Data by Type-Curve Matching," J.P.T. (Julio, 1974) 793-800.
17. Gringarten, A.C., Bourdet, D., Landel, P.A. y Kniazeff, V.: "A Comparison between different skin and wellbore storage type-curves for early-time transient analysis", Trabajo SPE No. 8205, presentado en la 54^{ava} reunión de SPE AIME, celebrada en las Vegas, Nevada, (Sept,23-26, 1979).
18. Bourdet, D., Whittle, T.M., Douglas, A.A. y Pirard, M.: "A new Set of Type Curves Simplifies Well Test Analysis," World Oil, (Mayo, 1983).
19. Gringarten, A.C.: "New Developments in Well Test Analysis," Charla Técnica, Stanford University, (Abril, 1991).
20. Gringarten, A.C., Ramey, H.J., Jr. y Raghavan, R.: "Pressure Analysis for Fractured Wells," J.P.T. (Julio, 1975) 887-892.
21. Cinco-Ley, H.: "Evaluation of Hydraulic Fracturing by Transient Pressure Analysis Methods," Trabajo SPE No. 110043 presentado en la Reunión de Ing. de Pet. en Beijing, China, (Marzo, 1982), 19-22,.
22. Kuhcuk, F., Karakas, M., y Ayestaran, L.: "Well Testing and Analysis Techniques for Layered Reservoirs," SPEFE (Agosto, 1986) 342-54.