

137
200



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**Modelo de Desplazamiento por Inyección
Continua de Vapor para
Microcomputadoras**



T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A
Jorge Eduardo Ceballos Vázquez

MEXICO, D. F.

1986

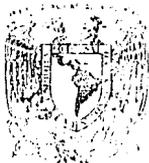


UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Escuela Nacional
de Ingeniería

Señor CEBALLOS VAZQUEZ JORGE EDUARDO.
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección, propuso el Profr. M.I.- Mario Becerra Zepeda, para que lo desarrolle como tesis para su Examen Profesional de la carrera de INGENIERO PETROLERO.

"MODELO DE DESPLAZAMIENTO POR INYECCION CONTINUA DE VAPOR PARA MICROCOMPUTADORAS"

INTRODUCCION.

- I DESPLAZAMIENTO POR INYECCION CONTINUA DE VAPOR.
- II MODELO DE JEFF JONES.
- III DESCRIPCION DEL PROGRAMA DE COMPUTO.
- IV EJEMPLOS DE APLICACION.

CONCLUSIONES.

NOMENCLATURA.

BIBLIOGRAFIA.

APENDICE. PSEUDOCODIGO Y CODIFICACION.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar -- Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como -- requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así -- como de la disposición de la Coordinación de la Administración -- Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D.F., Enero 20 de 1986.

EL DIRECTOR

Dr. Octavio A. Rascón Chávez

I N T R O D U C C I O N

El desplazamiento por inyección continua de vapor es un método de recuperación de aceite recomendable en yacimientos someros de aceite viscoso. Este proceso puede llegar a tener gran importancia si se toma en cuenta que en lo futuro será necesario explotar yacimientos que en la actualidad no tienen atractivo económico. Existen, cierto es, algunas condiciones que el yacimiento debe cumplir para ser susceptible de explotarse por medio de la inyección continua de vapor. De este tema se hablará más ampliamente en el capítulo I.

El uso cada vez más común de las microcomputadoras como una herramienta más de trabajo para el ingeniero petrolero, lleva a la necesidad de desarrollar programas de cómputo de fácil acceso y de aceptable confiabilidad. Por lo anterior, en el presente trabajo se desarrolló un programa de cómputo conversacional, en una microcomputadora COLUMBIA PRINTFORM, utilizando el lenguaje BASIC con el que se tiene la facilidad de realizar programas de tipo conversacional los que permiten su uso a casi cualquier persona sin necesidad de tener grandes conocimientos de computación.

El programa calcula tanto el gasto de inyección como el desplazamiento de aceite por medio de la inyección continua de vapor, conjunta o independientemente.

La base de dicho programa fué el modelo presentado por J. Jones¹ el cual está basado, a su vez, en los trabajos presentados por J. van Lookeren² y por Myhill y Stegemeyer³. Dicho modelo se presenta en el capítulo II.

Las facilidades de uso, así como el manual para el usuario se incluyen en el capítulo III, al que es conveniente estudiar antes de utilizar el programa con el fin de aprovecharlo de la mejor manera posible.

La nomenclatura utilizada se apega en lo posible a la propuesta por la SPE del AIIME, además de adecuarla para hacerla compatible con cualquier microcomputadora de las que se cuenta en el mercado. Tal nomenclatura se presenta también en este trabajo.

La confiabilidad del programa es aceptable en tanto sean confiables los datos que en él se introduzcan. No obstante, los resultados deben tomarse con las debidas reservas, inherentes a cualquier modelo matemático de simulación, a causa de las suposiciones que se hacen.

Se presenta el pseudocódigo del programa, así como la codificación en lenguaje BASIC.

Finalmente, se incluyen varios ejemplos de aplicación que pueden servir como orientación para el usuario del programa. Los resultados obtenidos en dichos ejemplos son comparados con los reportados en el trabajo que se usó como base para este programa.

CAPITULO I

DESPLAZAMIENTO POR INYECCION CONTINUA DE VAPOR.

Generalmente se propone la inyección de fluidos al interior de un yacimiento como un medio de recuperación secundaria o terciaria de aceite. Esta forma de recuperación térmica puede ofrecer una mayor aplicación, para yacimientos de aceite convencionales, que la combustión in-situ, ya que el proceso puede controlarse con mayor facilidad y los requerimientos del yacimiento son, en general, menos críticos. Debido a su gran capacidad calorífica neta, el vapor tiende a ser el más eficiente medio de inyección de calor, aunque también pueden emplearse otros medios de inyección de calor como son las mezclas de vapor con otros gases, el agua caliente, el aceite caliente y los gases calientes no condensables.

La evaluación económica de un proceso de recuperación térmica dependerá del ritmo de invasión, o de los ritmos de calentamiento productivo del yacimiento, a cualquier tiempo dado, después de comenzar la inyección de calor. Las pérdidas de calor por conducción hacia las capas adyacentes impondrán un límite económico al tamaño del área que puede ser barrida desde cualquier punto de inyección, para un grupo dado de condiciones de yacimiento y a cualquier gasto de inyección de calor determinado.

En la inyección continua de vapor el calor es generado en la superficie e inyectado a la formación por medio del vapor a través de los pozos -

destinados a ese fin.

Las ventajas de calentar el yacimiento de aceite por medio del calor transportado, como es el caso de la inyección continua de vapor, ya se preveían desde 1917 y durante los años veintes y treintas. En algunas ocasiones, el vapor fué empleado para remover la parafina acumulada en los pozos. No fué, sin embargo, hasta cerca de 1960 que la inyección de vapor surgió como tal debido al éxito de una compañía de servicios con la inyección cíclica en California. En nuestros días la inyección de vapor es considerada como un método bien establecido de recuperación de aceite, el cual incrementará su importancia en los años venideros.

La aplicación de calor al yacimiento (roca y fluidos), puede ayudar a la producción de aceites a través de la reducción de la viscosidad del aceite (la reducción es mayor en tanto disminuye la densidad API), la reducción en la saturación residual de aceite, los efectos de expansión térmica, el incremento en la eficiencia de barrido debido al mejoramiento en la relación de movilidades y el posible efecto de destilación de vapor.

El desplazamiento por inyección continua de vapor es muy parecido al desplazamiento por inyección continua de agua. Se inyecta vapor en un número determinado de pozos, en tanto que el aceite es producido por otros pozos, empleando un patrón geométrico conveniente. En comparación -

con la inyección cíclica, el vapor para el desplazamiento debe ser inyectado durante un considerable periodo de tiempo, la producción de aceite tarda más en comenzar y el tiempo para recuperar la inversión es mayor, aunque si se tienen las condiciones adecuadas la recuperación final del proceso será más alta.

I.1. Análisis del proceso de desplazamiento.

Para entender la manera en que se realiza el desplazamiento por inyección continua de vapor analicemos brevemente el proceso :

Cuando se inyecta vapor por un pozo, se forma una zona de vapor saturado alrededor del pozo inyector y más allá existe una zona que tiene vapor condensado (frente de condensación) como se muestra en la figura I.1

La temperatura en la zona de vapor es casi igual a la temperatura de inyección del vapor y va declinando ligeramente conforme se aleja del pozo a causa de la caída de presión ocasionada por el flujo. En la zona de vapor condensado la temperatura disminuye de la temperatura de inyección del vapor a la temperatura original del yacimiento.

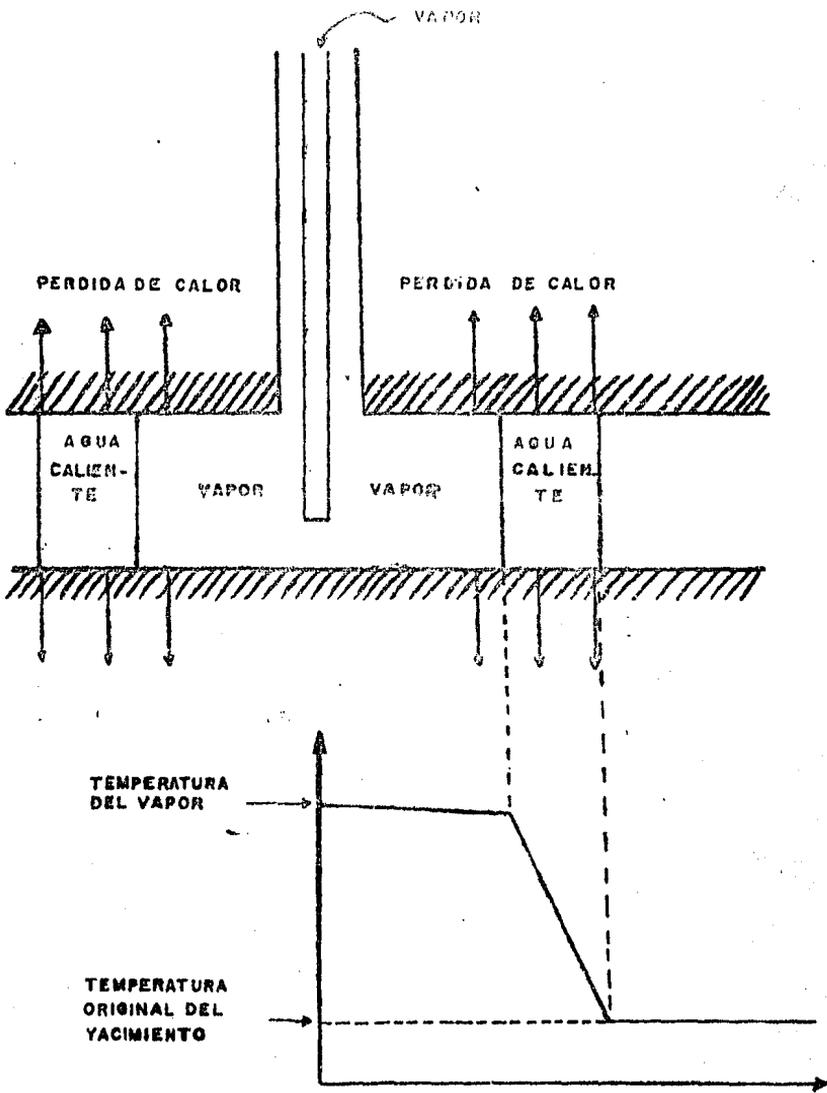


Fig. I.1.- Distribución de la temperatura en el yacimiento.

En la zona invadida de vapor, debido a la presencia de la fase gaseosa, tiene lugar la destilación del vapor. También, parte del aceite es desplazado a causa de los cinco efectos de empuje de la fase gaseosa. En la zona de agua caliente, mas adelante, tiene lugar un empuje por agua caliente. En esta zona el aceite recuperado es el resultado de varios efectos :

- Reducción de la viscosidad.
- Expansión térmica del aceite.
- Reducción de la saturación residual de aceite a temperaturas elevadas.
- Cambios en las características de permeabilidad relativa a altas temperaturas.

Sin embargo este último efecto mencionado aún no está entendido con toda claridad.

Más allá de la zona de agua caliente tiene lugar un desplazamiento por agua fría, el cual contribuye más aún a la recuperación de aceite.

La contribución de los varios mecanismos para la recuperación de aceite depende del tipo de aceite de que se trate. La tabla I,1 nos da una idea de la magnitud de los diferentes mecanismos que operan en un desplazamiento con vapor y está basada en datos de laboratorio reportados en la literatura técnica.

	Aceite no <u>destilable</u>	25% aceite <u>destilable</u>	50% aceite <u>destilable</u>
1.- Recuperación por desplazamiento - con agua caliente.	54,8	54,8	58,0
2.- Recuperación extra debida al empuje de la fase gaseosa.	3,0	3,0	3,0
3.- Recuperación extra debida a la destilación.	—	10,5	19,5
4.- Recuperación extra debida a los efectos de extracción solvente.	5,0	5,0	5,0
5.- Recuperación <u>total</u> del desplazamiento por vapor.	62,8	73,3	85,5

Tabla I.1.- Recuperación de aceite por los varios mecanismos que operan en el desplazamiento con vapor, % del aceite in-situ.

I.2. Desarrollo del yacimiento.

El elemento operativo consiste en un sistema de flujo radial, concéntrico al punto de inyección, con un perfil de temperatura idealizado como una función escalonada, ilustrado por la línea punteada en la figura I.2. En ésta la línea continua es un perfil de distribución cualitativo de la temperatura en forma radial.

Se demostrará que las expresiones dadas más adelante, las cuales son derivadas de la idealización escalonada simplificada (línea punteada), también puede ser interpretada en términos de una distribución de temperatura más realista mostrada en la figura I.3. Para este caso, el radio de inversión térmica es redefinido simplemente como la distancia desde el pozo de inyección hasta el punto medio de la distribución de temperatura.

El gasto máximo práctico de inyección de calor ($\dot{Q}_{iny\ max}$) que pueda ser mantenido durante la vida del proyecto debe ser evaluado con cálculos suplementarios del yacimiento o, preferiblemente, por pruebas piloto en el campo. El uso del adjetivo "práctico" en conexión con " $\dot{Q}_{iny\ max}$ " infiere que su valor debe limitarse, ya sea por la inactividad del yacimiento o por la limitación principal: el tamaño de la planta generadora de vapor. Para un gasto constante de inyección de calor \dot{Q}_{iny} , un balance directo de calor da:

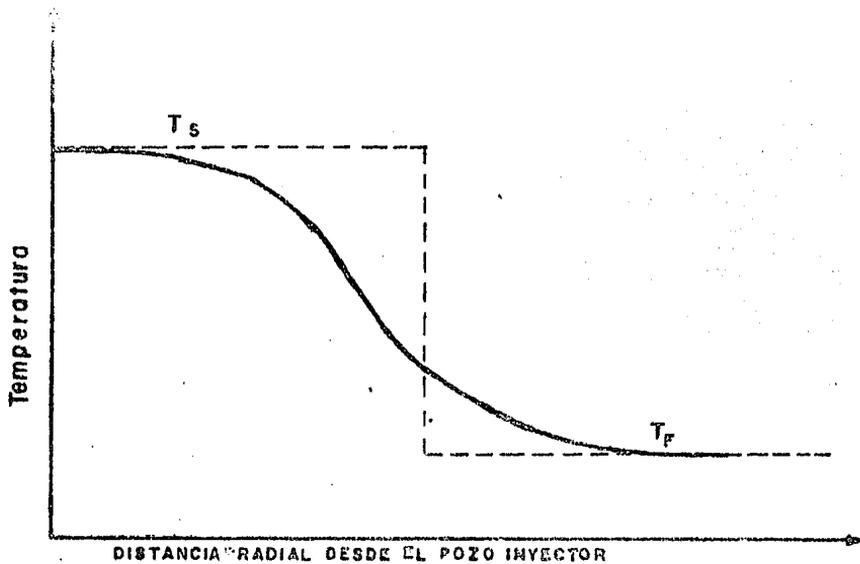


Fig. I.2.- Distribuciones de temperatura real e idealizada.

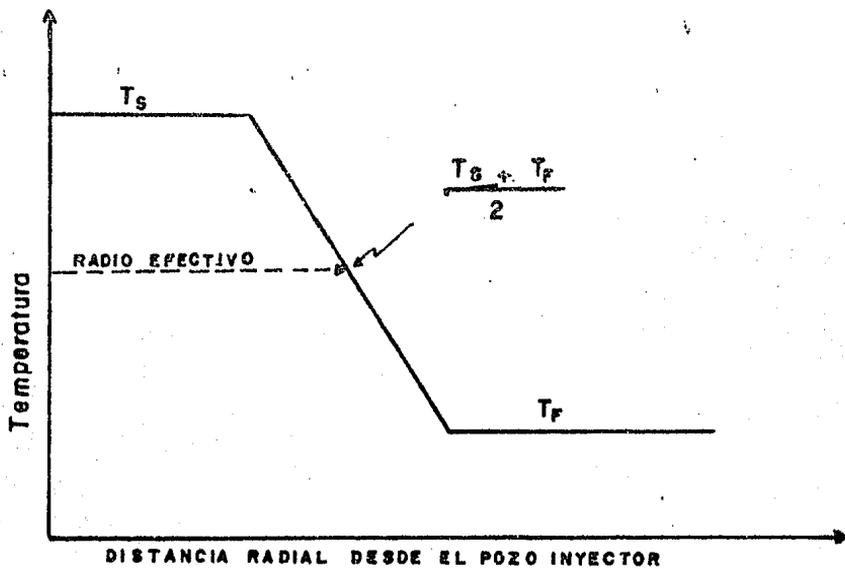


Fig. I.3.- Distribución de temperatura más realista.

$$\dot{Q}_{iny} = 2 \int_0^t \left[\frac{kh \Delta T}{D (8640 t - \lambda)} \right] \left(\frac{dA}{d\lambda} \right) d\lambda + M_1 hn \Delta T \frac{dA}{dt} \dots (I,1)$$

donde el primer término de la derecha representa la pérdida de flujo de calor, no aprovechado, hacia las capas adyacentes, y el segundo término describe el flujo de calor que se aprovecha en la zona costeable. La ecuación I.1 es análoga a la ecuación que describe el flujo de fluido en una fractura creciente limitada por superficies permeables. El investigador R. D. Carter ha demostrado que la solución integrada para el caso de fractura puede obtenerse usando la transformación de Laplace. Siguiendo su procedimiento y resolviendo para el área calentada por vapor $A_s(t)$, a cualquier tiempo "t", se tiene como resultado :

$$A_s(t) = \left[\frac{\dot{Q}_{iny} M_1 hn D}{4 kh \Delta T} \right] \left(e^{x^2} \operatorname{erfc} x + \frac{2x}{\sqrt{\pi}} \right) \dots (I,2)$$

de aquí se tiene que :

$$\frac{dA_s}{dt} = \left[\frac{\dot{Q}_{iny}}{M_1 hn \Delta T} \right] \left(e^{x^2} \operatorname{erfc} x \right) \dots (I,3)$$

el valor de "erfc x" de las ecuaciones anteriores puede ser evaluado con excelente aproximación utilizando la siguiente correlación :

$$\operatorname{erfc} x = (0.254829592 K - 0.284493763 K^2 + 1.421413741 K^3 - 1.453152027 K^4 + 1.061405429 K^5) e^{-x^2} \dots (I,4)$$

en donde :

$$K = \frac{1}{1 + 0,3275911 x} \quad \dots\dots(I.5)$$

y

$$x = \left[\frac{2 kh}{Ml \text{ hr} \text{ D}} \right] (8640 t)^{1/2} \quad \dots\dots(I.6)$$

una vez evaluada "x" y determinadas las propiedades físicas del sistema operativo, $A_s(t)$ y (dA_s/dt) pueden ser evaluadas por sustitución directa de los valores aproximados de la ecuación I.4 en las ecuaciones I.2 y I.3.

I.3 Pérdidas de calor.

Un aspecto importante en el diseño de un proyecto de recuperación térmica es la cuantificación de las pérdidas de calor ya que el calor es energía que se transfiere como resultado de una diferencia o gradiente de temperatura puesto que el calor fluye de regiones de alta temperatura a regiones de baja temperatura. Los mecanismos básicos de transferencia de calor son :

- Conducción.- Es el mecanismo de transferencia de calor de una parte de un cuerpo a alta temperatura a otra parte del mismo cuerpo a menor temperatura, o de un cuerpo de alta temperatura a otro cuerpo de menor temperatura en contacto físico con él.
- Radiación.- La radiación térmica es radiación electromagnética emitida por un cuerpo en virtud de su temperatura.

- Convección.- Es la transferencia de calor desde la superficie hacia un fluido en movimiento en contacto con ella o viceversa, o de una parte de un fluido en movimiento a mayor temperatura hacia otra parte del mismo a una menor temperatura. Si el fluido se mueve por diferencia de densidades, debido a las diferencias de temperatura, se dice que hay una convección libre. Si el movimiento del fluido se debe a una fuerza externa, por ejemplo un ventilador, la velocidad del viento, etc., se dice que hay convección forzada.

Las pérdidas de calor se presentan tanto en la superficie como en la formación. En la superficie, en cualquier sistema de inyección de vapor, el vapor que sale del generador fluye a través de la tubería superficial (frecuentemente enterrada) a la cabeza del pozo, y desde allí por la tubería del pozo hasta la cara de la formación. Por lo tanto, es evidente que una cierta cantidad de calor se perderá en la tubería superficial. Esto es del orden del 5 % del contenido de calor del vapor. Con respecto a la calidad del vapor, si el ritmo de pérdida de calor a través de la tubería superficial es Q_L (BTU/hr-pie), y si la caída de presión en la tubería es despreciable, entonces, para un flujo másico total de "y" (lb/hr), la calidad del vapor en la cabeza del pozo "fwh" está relacionada con la calidad del vapor en la descarga del generador "fgen" con la siguiente ecuación :

$$f_{wh} = f_{gen} - \frac{\dot{Q} L}{hfg} \dots\dots (I.7)$$

donde hfg es el calor latente del vapor a la presión media de la línea en (BTU/lb), y "L" es la longitud total de esta última en pies. Lo anterior es para tuberías sin aislamiento térmico ya que el cálculo del ritmo de pérdida de calor $\dot{Q} L$ por tuberías con aislamiento térmico involucra un proceso de ensayo y error. La pérdida de calor es debida a la conducción del calor del vapor dentro de la tubería a través de la capa límite interior, la pared del tubo, el aislamiento térmico y desde allí a través de la capa exterior de la tubería. A partir de este punto el calor se transfiere por radiación y convección. La tabla I.2 presenta algunos valores típicos de ritmos de pérdida de calor. En ella se puede observar que el uso de aislamiento térmico en las tuberías superficiales da como resultado una reducción de aproximadamente el 90 % en las pérdidas de calor, por lo que su uso es realmente recomendable.

I.4. Criterios de diseño.

Los criterios típicos de diseño para proyectos de inyección continua de vapor son, principalmente :

- La profundidad de la formación debe ser menor a 3000 pies para una respuesta favorable; ya que la presión crítica del vapor es de 3202 (lb/pg^2 abs), la profundidad de inyección no debe de exceder los 5,000 pies.

Pérdida de calor, BTU/hr-pie² de -
 área superficial a temperaturas in-
 teriores de :

Aislamiento	Condiciones		200 °F	400 °F	600 °F
Tubería de	Sin viento,	0 °F	540	1500	3120
metal des-	Sin viento,	100 °F	210	990	2250
cubierta.	Viento de 10 mph,	0 °F	1010	2540	4680
	Viento de 10 mph,	100 °F	440	1710	3500
	Viento de 40 mph,	0 °F	1620	4120	7440
	Viento de 40 mph,	100 °F	700	2760	5650
Tubería con	Standar sobre tub. de 3 pg		50	150	270
aislamiento	Standar sobre tub. de 6 pg		77	232	417
de Mg a 80 °F	1 1/2 pg sobre tub. de 3 pg		40	115	207
	1 1/2 pg sobre tub. de 6 pg		64	186	335
	3 pg sobre tub. de 3 pg		24	75	135
	3 pg sobre tub. de 6 pg		40	116	207

Tabla I.2.- Valores típicos de pérdida de calor en líneas conductoras de vapor -
 con y sin aislamiento.

- Para minimizar las pérdidas de calor, el espesor de la formación no debe ser menor de 30 pies.
- La permeabilidad de la formación debe ser alta (1 darcy o más) y la porosidad de la misma debe ser del orden de el 30 %.
- La densidad del aceite debe estar en un rango de 12 a 25 °API, con una viscosidad alrededor de 1000 cp a temperatura de yacimiento.
- El desplazamiento por inyección continua de vapor también podría ser efectivo en el caso de aceites ligeros, con densidades alrededor de 40 °API, cuando se espera que la destilación pueda contribuir grandemente a la recuperación.
- El aceite in-situ debe ser de 1200 a 1700 (bl/acre-pie) esto significa una saturación de aceite entre el 45 y el 75 % o mayor,
- La calidad del vapor debe ser cercana al 80 % y la presión de inyección menor a 2500 (lb/pg²).
- El vapor debe ser inyectado cerca de la base de la zona de aceite para tener mejores resultados.
- El patrón de la prueba piloto debe estar en un rango de 2 a 2 1/2 acres (1 acre = 0.4 ha). La escala completa de pruebas debe emplear patrones de

4 a 8 acres, esto es, si se tiene un patrón de pozos con arreglo pentagonal, el distanciamiento de los pozos no debe ser mayor de 1500 pies, o sea 500 metros.

- La recuperación de aceite por desplazamiento con vapor es en promedio del 40 %, en un rango del 35 al 50 % en yacimientos donde la recuperación primaria haya sido del 3 al 12 % del aceite original in-situ.

I.5 Aspectos operacionales.

En esta sección se considerarán brevemente el equipo superficial, las terminaciones de los pozos inyectores y productores y algunos problemas operacionales frecuentemente encontrados en los proyectos de inyección de vapor. En las referencias indicadas está contenida la información detallada acerca de cada uno de estos temas y es la que debe de ser consultada antes de hacer alguna aplicación en el campo.

El equipo superficial consiste en generadores de vapor, líneas conductoras de vapor, equipo de tratamiento de agua y cabezales de pozo. Estos son los elementos que serán analizados en forma breve a continuación.

- Generadores de vapor. Los generadores de vapor utilizados en las operaciones de inyección de vapor son del tipo de un paso (once-through). El sistema de flujo consiste esencialmente de un tubo espiral simple, por el que fluye el agua que entra por uno de los extremos de los varios tubos de ali

mentación. Al fluir por el tubo espiral, el agua es calentada y finalmente evaporada. El vapor húmedo se descarga por el otro extremo, en el cual se encuentra el quemador. Este arreglo es el más deseable, ya que se minimizan los choques térmicos. Por tanto, el tubo espiral es el elemento más importante de el generador y su diámetro varía entre 2 y 3 pg. El diseño puede ser de "pared caliente" o de "pared fría". El diseño de "pared caliente" utiliza un amplio espaciamiento de la tubería (6 pg), en tanto que en el caso de "pared fría" el espaciamiento es menor (3 pg). En este último caso el generador responde rápidamente a los cambios en la cantidad de agua surtida, ritmo de calentamiento, etc.

Los generadores de vapor pueden funcionar con crudo, gas natural o propano. La combustión con crudo dejará residuos de materia extraña sobre las aspas en la sección de convección, causando taponamiento. Esta sección deberá ser venteadada ocasionalmente, de otra manera la flama estará mal alimentada, incrementándose el material no quemado y causando un apagón eventual del generador.

La presión de salida de la bomba debe ser igual a la del generador más la caída de presión debida al flujo del agua desde la bomba hasta el generador, por eso un incremento en la presión puede indicar la presencia de depósitos en el tubo del generador. Se debe hacer notar que con el diseño descrito es importante que la calidad del vapor en la descarga sea menor del

100 %, o sea del orden del 80 %. De esta manera cualquier material disuelto en el vapor será acarreado en la fase líquida, en lugar de ser depositado en las paredes internas del tubo.

Los detalles de la construcción del generador de vapor, su funcionamiento y mantenimiento pueden encontrarse en la literatura técnica ^{9,10,11}.

La determinación de la calidad del vapor se hace generalmente empleando medidores de orificio ¹², sin embargo, en el diseño de "pared fría", la calidad también puede ser determinada dividiendo el gasto de flujo másico de vapor entre el flujo másico de agua, con la válvula de la bomba surtidora de agua abierta hasta que el vapor descargado sea ligeramente sobrecalentado.

Usualmente la presión de salida del generador es aproximadamente igual a la presión de fracturamiento de la formación.

- Líneas conductoras del vapor. Para minimizar las pérdidas de calor en la superficie el sistema de distribución de vapor debe ser diseñado de tal manera que recorra la mínima distancia posible. También es recomendable utilizar un aislamiento térmico, aún cuando las líneas se encuentren enterradas.

Para prevenir que el pozo tenga un contraflujo hacia el generador durante un apagón es necesario colocar en la línea conductora al menos dos -

válvulas de retención. Las válvulas y medidores deben ser consistentes con los gastos de el generador por lo que no deben estar sobre-diseñados.

En la inyección continua de vapor generalmente se utilizan sistemas de una sola línea, debido al ahorro que esto representa. Esto es posible ya que en los pozos inyectoros sólo se maneja un fluido : el vapor.

Todas las líneas conductoras de vapor, enterradas o a flor de tierra, deben proveerse, además, de juntas de expansión adecuadas. Tales juntas son adecuadas y efectivas solamente si las líneas que las contienen están ancladas en los dos extremos, así las expansiones térmicas son absorbidas por dichas juntas. También debe colocarse una junta de expansión o un eslabón giratorio en el cabezal debido a los efectos de las altas temperaturas. Se dan más detalles de los arreglos de las líneas conductoras de vapor en la referencia 13.

- Tratamiento de agua. El tratamiento del agua para generar vapor es una parte importante de los proyectos de inyección de vapor, ya que el tener agua de calidad aceptable dará como resultado un buen funcionamiento del generador y evitará la corrosión y erosión de sus partes. Esto obviamente es de gran importancia si se toma en cuenta que el generador de vapor es el elemento principal del sistema y que una falla en él sería, además de una pérdida económica, un posible fracaso del proyecto, debido a la necesidad de mantener un gasto constante de inyección para obtener resul

tados satisfactorios.

Si el agua utilizada para alimentar al generador tiene un alto contenido de sólidos, éstos pueden ser acarreados en el vapor y llegar a disminuir la inyectividad de la formación o, incluso, causar su taponamiento.

En el tratamiento del agua el bicarbonato es removido por acidificación y desgasificación. En seguida el Calcio, el Magnesio y el Silice son reducidos en el proceso de cal fría utilizando un precipitador de manta. Ya que el proceso opera con alto pH, el hierro también precipitará.

Se requiere agregar algunos aditivos químicos para proteger a la caldera de pequeñas cantidades de depósitos, o también puede agregarse zeolita como un agente limpiador por pulimiento adicional.

El agua que alimenta al generador debe tener menos de 1 ppm de oxígeno disuelto, menos de 2500 ppm de sólidos disueltos y menos de 5 ppm de Silice. Otra condición es que el pH esté entre 9 y 10. En la literatura se pueden encontrar otros detalles del equipo y procedimientos de tratamiento de agua 14, 15.

- Terminaciones para pozos inyectoros y productores. Cuando se caliente la tubería de revestimiento o la de producción, o en su caso de inyección, se expande " ΔL " pies, y esta expansión está dada por:

$$\Delta L = 7(10^{-6}) \Delta T L \quad \dots\dots(1.8)$$

donde "L" es la longitud de la tubería, en pies, y " ΔT " es el incremento de temperatura, en °F. La prevención de la expansión, fijando los dos extremos, inducirá a un esfuerzo S, en (lb/pg²), en la tubería dado por :

$$S = 7(10^{-6}) \Delta T E \quad \dots(1.9)$$

donde E es el módulo de elasticidad para el acero cuyo valor normal es de 29×10^6 (lb/pg²). Nótese que el esfuerzo mostrado, debido a un cambio de temperatura, es independiente de la longitud.

Todos los pozos de inyección están sujetos a grandes variaciones de temperatura. Esto puede causar en ellos daños por compresión, telescopiándose los coplees o doblándose en el punto de colapso, seguidos por fallas en la tensión durante la etapa de enfriamiento. La resistencia a la tensión, en la mayoría de los aceros, decrece rápidamente arriba de los 500 °F. Con respecto a los efectos térmicos, el acero que tiene las propiedades más deseables es el de especificación P-105 de el API.

Una de las recomendaciones prácticas en las terminaciones de pozos inyector de vapor es la de colocar una junta de expansión en la tubería inyectora y un empacador térmico. El empacador térmico debe colocarse en una superficie limpia y pulida. Para obtener todos los beneficios que ofrece el empacador térmico, el espacio anular debe ser venteado durante el periodo de calentamiento inicial para remover cualquier vapor formado por la evaporación del agua en el espacio anular.

La tubería de revestimiento debe estar libre en la parte superior para permitir la expansión térmica. La tubería de revestimiento corta (liner) debe colocarse de manera que quede arriba del fondo para permitir una expansión hacia abajo. En esta tubería es recomendable colocar también una junta de expansión.

El cemento utilizado debe contener del 30 al 60 %, en peso, de fluoruro de silice, para estabilidad de temperatura; la adición de un 10 % o más, en peso, de cloruro de sodio permitirá una expansión hasta del 0.17 %. La adición de reductores de fricción a las lechadas a base de agua salada dará una adhesión más efectiva. Se recomienda el uso de el cemento API clase G y los cementos Pozzolan.

Los pozos productores deben de terminarse normalmente con tuberías API - clase H -40 ó J-55 sin riesgo de tener problemas ya que las temperaturas son mucho menores que en los pozos de inyección. En los pozos productores un empaquetamiento de grava y un liner, utilizado como cedazo, evitarán la producción de arena ¹⁶.

El cabezal debe permitir el uso de las temperaturas y presiones requeridas. Cuando la tubería de revestimiento no esté cementada hasta la superficie, el cabezal debe permitir la contracción y expansión, usando un borde empaquetador deslizable.

- Problemas operacionales. Los efectos de las fallas en los proyectos de inyección de vapor cubren un rango que va desde la completa pérdida del pozo hasta el no obtener un incremento en la recuperación. El principal problema parece ser las fallas en la tubería de revestimiento y el liner debido al diseño inapropiado, especialmente en pozos de 1500 pies, o más, de profundidad.

La baja inyectividad de la formación puede llevar a un fracaso económico, debido a la excesiva pérdida de calor. También una baja eficiencia en el generador puede causar bajos gastos de inyección y no alcanzar el gasto óptimo, en ocasiones ni el mínimo requerido para una operación exitosa.

Otro problema que se presenta es la producción de arena la cual puede causar teponamiento en los liners y erosión en el equipo, tanto de fondo como superficial, en los pozos productores. Además las altas temperaturas pueden acelerar el proceso de erosión de los equipos.

Otros problemas operacionales, incluyendo las fallas mecánicas del generador, las fallas del empacador, y la emulsión de la formación, pueden evitarse si se realiza un diseño cuidadoso y adecuado.

CAPITULO II
 MODELO DE JEFE JONES

El modelo de Jeff Jones consiste en dos partes que pueden utilizarse conjunta o separadamente. Las ecuaciones utilizadas en la primera parte - permiten obtener el gasto óptimo de inyección de vapor , el cual está ligado con la máxima eficiencia del proceso, o también puede usarse para obtener solamente las condiciones de inyección, esto es la presión y temperatura de inyección, si se tiene un gasto determinado el cual puede estar limitado por el equipo con que se cuenta.

II.1 Modelo de optimización del gasto de inyección de vapor.

La primera parte está basada en las siguientes ecuaciones:

La ecuación principal es la propuesta por J. van Lockeren para la eficiencia:

$$E = \frac{5900 \sqrt{p_s} \cdot i_s \cdot f_s}{\pi (p_0 - p_s) \cdot h_n \cdot k_s \cdot l_s} \dots \dots \dots (II.1)$$

Farouq Ali encontró que graficando la temperatura del vapor (°F) contra la presión de inyección (lb/pg²) en papel logarítmico se obtenía una línea - recta cuya ecuación es :

$$T_s = 115.1 \cdot p_s^{0.225} \dots \dots \dots (II.2)$$

y para condiciones geométricas :

$$p_s = p_1 \cdot e^{m(i_s - i_{s1})} \dots \dots \dots (II.3)$$

$$m = \frac{\ln(p_2/p_1)}{(i_{s2} - i_{s1})} \dots \dots \dots (II.4)$$

o para condiciones lineales:

$$ps = p_1 + m (is - is_1) \dots\dots\dots (II.5)$$

$$m = \frac{P_2 - P_1}{is_2 - is_1} \dots\dots\dots (II.6)$$

además se tienen las siguientes correlaciones:

$$P_s = 5.06 e^{0.000359 ps} - 5 \dots\dots\dots (II.7)$$

$$P_o = \frac{141.5}{API + 131.5} - 62.4 \dots\dots\dots (II.8)$$

$$P_s = 0.0000517 T_s + 0.00049 \dots\dots\dots (II.9)$$

Como P_s y M_s son funciones de la presión, E_I en la ecuación (II.1) - tiene un valor óptimo para una relación dada de presión/inyección, Van Lookeren reportó que había una función aún indeterminada que relacionaba a E_I con h_s , pero demostró que la maximización de E_I daba como resultado una maximización de la eficiencia de barrido. Por lo tanto el objetivo es buscar el "is" que haga máxima la eficiencia de barrido vertical, E_I^* , y éste será el gasto óptimo a utilizar.

Lo anterior implica un procedimiento de ensayo y error por lo que el uso de una computadora es lo más deseable para la rápida obtención de resultados.

Se considera que los parámetros de inyección permanezcan constantes, por tanto las pruebas de inyectividad inicial en un proyecto nuevo probablemente no serán muy útiles. Sin embargo, se considera que después de un año de in-

ycción continúa se pueden utilizar los datos con bastante confiabilidad. - Así mismo, éstos datos pueden ser obtenidos de pozos inyectoros vecinos, dependiendo de las condiciones prevalecientes.

II.2 Modelo de desplazamiento de aceite.

Esta parte del modelo está basada en el trabajo presentado por Myhill y Stegemeier², el cual es a su vez una adaptación de soluciones previas propuestas por Marx y Langenheim⁴ y la propuesta por Mandl y Volek⁵.

El problema con estos tres modelos es que cada uno predice un gasto de desplazamiento de aceite basado en el ritmo de crecimiento de la zona de vapor que concluye solamente en el punto en el cual las pérdidas de calor son iguales al gasto de calor inyectado. En la figura (II.1) se ilustra este problema. Nótese que hay un periodo de semi-empuje cuando el modelo de desplazamiento de Myhill y Stegemeier alcanza el gasto de producción real del pozo. Sin embargo, la producción anterior y posterior están muy abajo del gasto desplazado predicho. Para enfrentar a este problema se aconseja aplicar un factor arbitrario de "eficiencia de capture" para una predicción invariablemente optimista. Desafortunadamente, el factor tiene un valor que depende de la terminación del empuje y no da como resultado gastos de producción instantáneos reales. Debido a esto no es conveniente usar tal modelo analítico como una guía rápida o como una herramienta preliminar de diseño si se usan métodos manuales.

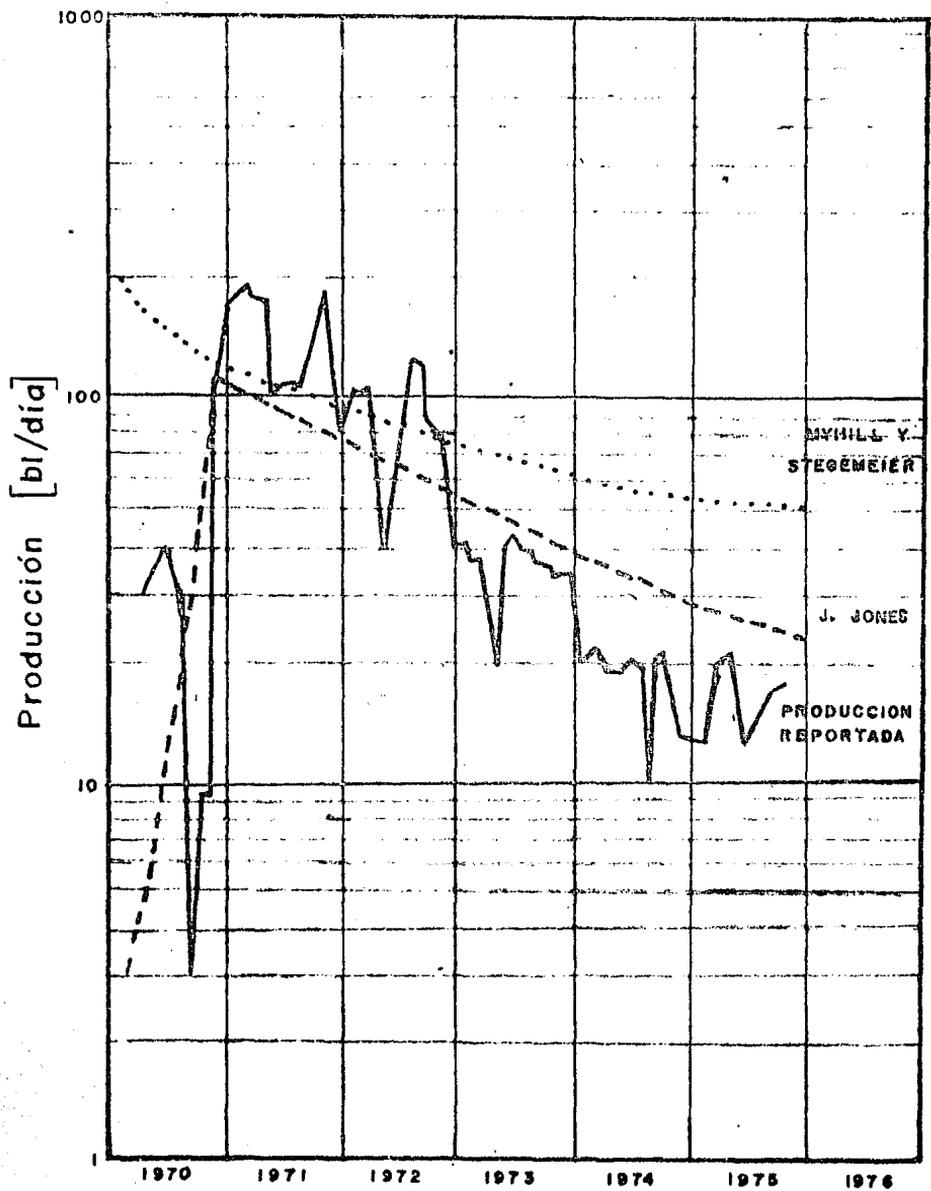


Fig. II.1.- Historia de producción real vs. predicciones de los modelos matemáticos. Campo KERN RIVER 'A'.

Por lo tanto con la utilización de una computadora la conversión de ritmo de desplazamiento a gasto de producción se puede hacer fácilmente y en un tiempo menor; se considera que el proyecto de desplazamiento tiene las tres etapas principales de producción siguientes :

1.- La primera etapa es dominada por la viscosidad inicial del aceite y posiblemente es afectada por el "llenado" del yacimiento si existe un espacio vacío significativo. Lo anterior es más pronunciado para altas viscosidades de aceite y casi inexistente para aceites de baja viscosidad, ya que el flujo a través de un medio poroso es proporcional a la viscosidad del fluido. Para un área patrón dada y una viscosidad de aceite, el vapor inyectado inicialmente se condensa con rapidez y la fase acuosa se canaliza a través de la más viscosa fase de aceite. Esta canalización temprana es inevitable en gran medida como lo muestra un cálculo rápido de la ecuación de flujo radial. Sin el mecanismo de canalización, serían imposible inyectar vapor o agua con los gastos y presiones observados típicamente en los proyectos de campo.

En tanto que el vapor imparte calor a una mayor área del yacimiento se desplaza más aceite y aumenta el gasto de producción hasta que una cierta fracción del área patrón es barrida. La ecuación (II,30) es una expresión de esta dependencia viscosidad/ área exhibida por los gastos de producción iniciales.

2.- La segunda etapa de producción normalmente es dominada por la movilidad del aceite caliente y la permeabilidad del yacimiento, y el gasto de producción es, esencialmente, el gasto de inyección. Es al principio de este período que ocurre la producción máxima, referida normalmente al arribo del banco de aceite. La duración de esta segunda etapa es controlada por la cantidad de aceite no desplazado y/o la eficiencia de calentamiento del yacimiento. Si se aplicara la solución de Myhill y Stegemeier desde este punto hasta la terminación del proyecto, la recuperación acumulativa de aceite predicha excedería fácilmente al aceite in-situ.

3.- La tercera fase de producción, por tanto, es dominada por la porción móvil remanente del aceite original in-situ, como se expresa en la ecuación (II.31). Esta función establece, en efecto, que el desplazamiento/producción de aceite es controlado en mayor medida por la cantidad de aceite que se dejó de producir. Así, en algún punto antes de la recuperación del 100 % del aceite móvil, la relación aceite/vapor instantánea dejará de ser económicamente atractiva.

Como se asentó anteriormente Jeff Jones basó su modelo en el presentado por Myhill y Stegemeier, modificándolo para hacerlo más eficiente y con resultados más aproximados a los obtenidos en el campo. En el modelo, el gasto de aceite desplazado se maneja como una función de la relación acumu

lativa del aceite producido y el agua inyectada en forma de vapor (Fos), - la cual es a su vez una función de la eficiencia térmica total del yacimiento (Ehs). Las constantes empleadas en las ecuaciones fueron calculadas de tal manera que las unidades sean congruentes.

Las ecuaciones que conforman el modelo se presentan a continuación en dos partes: Los cálculos para el desplazamiento del aceite y los cálculos para la producción del aceite:

Cálculos para el desplazamiento de aceite.

La eficiencia térmica promedio del proceso está dada por :

$$E_{hs} = \frac{1}{t_D} \left[e^{t_D} \operatorname{erfc} \sqrt{t_D} + 2 \sqrt{\frac{t_D}{\pi}} - 1 \right] - \sqrt{\frac{t_D - t_{cD}}{\pi}} \left(\frac{1}{1 + F h_D} + \frac{t_D - t_{cD} - 3}{3} e^{t_D} \operatorname{erfc} \sqrt{t_D} - \frac{t_D - t_{cD}}{3 \sqrt{\pi t_D}} \right) \dots \dots \dots (II.10)$$

donde: $t_D = \frac{4 kh M_2 t}{ht^2 M_1^2} \dots \dots \dots (II.11)$

Asumiendo que las capas adyacentes tienen una capacidad calorífica (M₂) de 1.2 veces la del yacimiento y pasando el tiempo (t) a base anual tenemos:

$$t_D = \frac{4 kh (1.2 M_1) (365.24)t}{ht^2 M_1^2} \dots \dots \dots (II.12)$$

y simplificando:

$$t_D = \frac{42048 kh t}{ht^2 M_1} \dots \dots \dots (II.13)$$

También tenemos que:

$$t_{cD} = 0.48 F h_D \quad 1.71 \dots \dots \dots (II.14)$$

la cual es una solución aproximada que nos ayudará a ahorrar tiempo de ejecución. El tiempo crítico adimensional (t_{cD}) es, por lo tanto, una función adimensional de la calidad adimensional del vapor (Fh_D) y ésta se puede calcular con:

$$Fh_D = \frac{ts \text{ hfg}}{C_w \Delta T} \dots\dots\dots(\text{II.15})$$

donde

$$\text{hfg} = 865 - 0.207 \text{ ps} \dots\dots\dots(\text{II.16})$$

En la ecuación (II.10) el término $\text{erfc}\sqrt{t_D}$ se puede calcular (como se vió - en el capítulo I) con:

$$\text{erfc}\sqrt{t_D} = (0.25482992 K - 0.284496736 K^2 + 1.421413741 K^3 - 1.453152027 K^4 + 1.061405429 K^5) e^{-t_D} \dots\dots (\text{II.17})$$

donde:

$$K = \frac{1}{1 + 0.327911\sqrt{t_D}} \dots\dots\dots(\text{II.18})$$

El desplazamiento acumulativo de aceite se puede calcular con la siguiente - ecuación:

$$N_d = \text{Fos}' V_s, \text{ iny} \dots\dots\dots(\text{II.19})$$

donde:

$$\text{Fos}' = \frac{\rho_w C_w}{M_1} \frac{hn}{ht} \Delta S_o \acute{O} (1 + Fh_D) \text{ Ehs} \dots\dots\dots(\text{II.20})$$

Ahora, el área invadida por vapor, basándose en Marx y Langenheim, es:

$$A_s = \frac{Q_{iny} hn}{4 kh (ts-tf) 52272} (e^{t_D} \text{erfc}\sqrt{t_D} + 2\sqrt{\frac{t_D}{\pi}} - 1) \dots\dots\dots(\text{II.21})$$

donde :

$$\dot{Q}_{iny} = 14.6 \text{ is } \left[hf + f_s hfg - C_w (T_f - 32) \right] \dots\dots\dots (II.22)$$

y según Farouq Alf :

$$hf = 91 \text{ ps }^{0.2574} \dots\dots\dots (II.23)$$

La eficiencia total del proceso será:

$$E_D = (0.21 C_o + 5.6) E_b \text{ Fos} \dots\dots\dots (II.24)$$

en la ecuación anterior se considera $E_b = 0.8$ lo que nos da como resultado:

$$E_D = (0.168 C_o + 4.48) \text{ Fos} \dots\dots\dots (II.25)$$

Cálculos de producción.

Con el análisis anterior podemos obtener una curva de gasto de desplazamiento de aceite similar a la obtenida por Myhill y Stegemeier mostrada en la figura (II.1). Esta se puede convertir en una curva de gastos de producción con el siguiente proceso:

$$q_{od} = q_{od} A_{cD} V_{oD} V_{pD} \dots\dots\dots (II.26)$$

donde:

$$q_{od} = \frac{N_{dn} - N_{dn} - 1}{t} \dots\dots\dots (II.27)$$

$$V_{pD} = \left(\frac{5.62 V_s \text{ iny}}{43560 A \text{ hn } D \text{ Sg}} \right)^2 \dots\dots\dots (II.28)$$

y simplificando:

$$V_{pD} = \left(\frac{1.29017 \times 10^{-4} V_s \text{ iny}}{A \text{ hn } D \text{ Sg}} \right)^2 \dots\dots\dots (II.29)$$

teniendo como límites : $0 \leq V_{pD} \leq 1.0$ y $V_{pD} = 1.0$ cuando $S_g = 0.0$

$$Ac_D = \left(\frac{As}{A \left[0.11 \ln \left(\frac{\mu_{oi}}{100} \right) \right]^{1/2}} \right)^2 \dots\dots\dots(II.30)$$

teniendo como límites : $0 \leq Ac_D \leq 1.0$ y $Ac_D = 1.0$ cuando $\mu_o \leq 100$ cp

$$V_{oD} = \left(1 - \frac{N_P S_{oi}}{N S_o} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(II.31)$$

teniendo como límites : $0 \leq V_{oD} \leq 1.0$

Donde N está dada por:

$$N = \frac{43560 A h_n \theta S_{oi}}{5.62} \dots\dots\dots(II.32)$$

o sea:

$$N = 7760.8897 A h_n \theta S_{oi} \dots\dots\dots(II.33)$$

La relación anterior fué derivada de un juego de curvas con datos de muchos proyectos de empuje reportados en la literatura. Como se muestra en la ecuación (II.30), el gasto de producción inicial es función de la viscosidad inicial del aceite in-situ y del patrón areal. Esto no quiere decir que esos dos factores sean los únicos que afectan al truncamiento de los gastos iniciales de producción, pero parece ser que son los que más dominan.

La ecuación (II.31) normalmente afecta solo a la producción final y permite la producción de solamente una cierta fracción del aceite móvil ($S_{oi} - S_{or}$).

La relación acumulativa de aceite/vapor es :

$$F_{us} = \frac{\sum_0^t q_o \Delta t}{V_{s, iny}} \dots\dots\dots(II.34)$$

1.3. Ecuaciones para las propiedades térmicas.

Se tiene un cálculo adecuado de M_1 con la ecuación :

$$M_1 = (1 - \delta) \rho_R C_R + \delta f_s (1 - S_{or}) (\rho_s C_s + \delta S_{or} \rho_o C_o + \delta (\sqrt{1 - f_s}) (1 - S_{or}) \rho_w C_w) \dots\dots\dots(II.35)$$

donde:

- $\rho_R = 165 \text{ lbm/pie}^3$
- $C_R = 0.20 \text{ BTU/lbm-}^\circ\text{F}$
- $\rho_w = 62.4 \text{ lbm/pie}^3$
- $C_s = C_w = 1.0 \text{ BTU/lbm-}^\circ\text{F}$
- $C_o = 0.45 \text{ BTU/lbm-}^\circ\text{F}$
- $\rho_{s=} = 0.0 \text{ lbm/pie}^3$

Con esta última consideración el segundo término de la derecha en la ecuación (II.35) es despreciable.

El término $(\sqrt{1 - f_s})$ es una expresión arbitraria de el hecho de que la calidad del vapor en el yacimiento varía entre f_s en la pared del pozo y 0.0 en el frente de condensación.

Somerton derivó una ecuación para kh en arenas no consolidadas, saturadas de líquido. Esta ecuación se puede utilizar como una buena alternativa si no se tienen datos confiables para este valor, dicha ecuación es :

$$k_h = 1.04 - 1.30 \phi + 0.29 K_R (1 - S_{oi})^{1/2} \dots\dots(II.36)$$

donde $K_R = 2.75 \text{ BTU/pie-hr}^\circ\text{F}$ a 125 °F. Los efectos de presión y temperatura se desprecian.

CAPITULO III

DESCRIPCION DEL PROGRAMA DE COMPUTO

El programa de cómputo presentado en este trabajo está basado en el modelo propuesto por Jeff Jones (capítulo II) y está codificado en lenguaje BASIC.

Por ser un programa de tipo conversacional, es de fácil acceso y puede ser utilizado por cualquier persona que tenga cierta idea de el fin que se persigue al ejecutar el programa.

La validación de los datos se realiza en forma automática, esto es, si se introduce un valor que no esté en los rangos aceptados por el programa, o si se responde a alguna de las preguntas de manera diferente a las opciones presentadas entre paréntesis, se marcará un error y el usuario tendrá una nueva oportunidad de introducir el dato o contestar la pregunta formulada (por lo general las respuestas son: "SI" ó "NO"). Por ejemplo, cuando se pregunta sobre el dato de la porosidad, éste debe de introducirse en forma fraccionaria, es decir, si la porosidad de la formación es del 22% entonces deberá de contestarse:

POROSIDAD DE LA FORMACION (fracc.) = ? 0.22

La respuesta es lo que está subrayado. De otra manera si se contestara:

POROSIDAD DE LA FORMACION (Fracc.) = ? 22 ó 22%

Cualquiera de las dos respuestas nos llevaría a:

|| E R R O R ||

POROSIDAD DE LA FORMACION (Fracc.) = ?

En este momento se debe contestar correctamente, es decir, contestar 0.22 ó .22 (en este ejemplo); de otra manera, si la respuesta está nuevamente afuera de el rango de cero a uno, se marcará otra vez error y se dará otra oportunidad hasta que el dato sea satisfactorio.

Siguiendo el modelo propuesto por J. Jones, el programa está dividido en 2 partes. La primera parte (Fase 1) calcula el gasto óptimo de inyección de vapor, así como la presión y temperatura a la que deberá inyectarse el vapor para obtener la máxima eficiencia. En caso de tener un gasto de vapor determinado se calcularán las condiciones de presión y temperatura de inyección. La segunda parte (FASE 2) calcula el comportamiento del desplazamiento para intervalos de tiempo determinados por el usuario; los resultados que arroja son el gasto de aceite promedio producido en el período de tiempo, el aceite producido acumulativo, la relación aceite producido/vapor inyectado tanto instantánea como acumulativa y el tamaño de la zona de vapor.

En lo que se refiere a la impresión de datos y resultados, primero se imprimen todos los datos que se hayan introducido para correr la primera

fase y enseguida los resultados de ésta que son seguidos por los datos de la segunda fase y sus resultados. La fase 1 y la fase 2 pueden correrse independientemente o conjuntamente, dependiendo de los requerimientos del usuario.

A continuación se dan las indicaciones necesarias para el correcto uso del programa las cuales son bastante sencillas. Si se siguen tales indicaciones y si se tienen datos adecuados, tanto de laboratorio como de campo, se puede aprovechar al máximo el presente programa.

La parte subrayada es la que debe ser tecleada por el usuario.

Al final de este capítulo se encuentra una tabla de conversiones que puede ser de mucha utilidad cuando no se tienen los datos en unidades congruentes con los del programa.

Tanto para la fase 1 como para la fase 2 se tienen las siguientes indicaciones :

1.- Datos del campo.

En esta parte se introducen como datos el nombre y la ubicación (distrito o estado) del campo, así como las iniciales o el nombre de la persona que utilizó el programa. En estos datos se puede utilizar cualquier nombre, por ejemplo:

Nombre del campo : ? HIPOTETICO ó RIO NUEVO
Ubicación : ? COMALCALCO TABASCO
Usuario : ? JECV ó JUAN PEREZ P.

2.- Parte del programa que se desea correr.

Si se desea correr la parte 1 (optimización del gasto de inyección) - deberá teclarse el número 1. Ahora bien, si se desea correr solamente la parte 2 (desplazamiento de aceite) deberá teclarse el número 2 e introducir como datos, además de los datos generales, el gasto de inyección de vapor, así como la presión y la temperatura de inyección.

Si por equivocación se da una respuesta diferente de las anteriores - (1 ó 2) se marcará error y se tendrá una nueva oportunidad de responder. Como ejemplos se tienen :

Desea correr la parte 1, que determina el gasto óptimo (teclea 1) o - la parte 2, que determina el comportamiento del desplazamiento (teclea 2):? 4.

;; E R R O R ;;

Desea correr la parte 1, que determina el gasto óptimo (teclea 1) o la parte 2, que determina el comportamiento del desplazamiento (teclea 2) : ? 1

Con esta última respuesta el programa proseguirá la ejecución.

Para la FASE 1 se tienen:

3.- Introducción de datos básicos.

Los datos básicos necesarios para correr la primera fase del programa son:

- Presión de inyección 1 (lb/pg² abs). Aquí debe introducirse como dato la presión obtenida en la primera prueba de inyectividad de la formación.

- Presión de inyección 2 (lb/pg² abs). Es análogo a la anterior pero para otra prueba de inyección. Invariablemente debe ser mayor que la presión 1. En caso contrario habrá un error y se tendrá una nueva oportunidad de introducir los dos datos anteriores.

- Gasto de inyección de vapor 1 (bl/día). Es el gasto de inyección de vapor correspondiente a la presión de inyección 1 de la prueba de inyectividad. Es importante aclarar que todo los gastos de vapor se manejarán en barriles equivalentes de agua fría por día. Esto es, el gasto de agua con que se alimenta el generador por la eficiencia de éste último.

- Gasto de inyección de vapor 2 (bl/día). Es el gasto correspondiente a la presión de inyección 2. Obviamente, debe ser mayor que el gasto de inyección 1 ya que de otro modo se marcará un error y se tendrá otra oportunidad de introducir los gastos anteriores.

- Relación de flujo de la prueba de inyección. Esta relación puede ser de dos tipos:

i) Relación de inyección lineal. En este caso debe de teclarse el número 1 como respuesta a la pregunta:

Rel. de flujo de la prueba (lineal = 1, geométrica = 2) : ? 1

2) Relación de inyección geométrica. En cada caso la respuesta debe ser el número 2.

En caso de responder de manera diferente a la anterior (1 ó 2), se marcará error y se tendrá otra oportunidad de teclear la respuesta.

- Espesor neto de la formación (pies). Se refiere al espesor efectivo de la formación, esto es, el espesor realmente impregnado de aceite del intervalo total de la formación al que se va a inyectar vapor.

- Calidad del vapor inyectado (fracc.). Es la calidad del vapor inyectado en la cara de la formación, o sea que será menor a la calidad a la salida del generador. Este dato debe introducirse en forma de fracción ya que en caso contrario se marcará error y se deberá introducir nuevamente pero ahora sí con las unidades correspondientes. Por ejemplo, si la calidad del vapor en la cara de la formación es igual al 65 % deberá introducirse:

Calidad del vapor inyectado (fracc.) = ? 0.65 ó .65

- Permeabilidad relativa al vapor (darcies). Este dato debe obtenerse de pruebas de análisis petrofísicos en el laboratorio. Hay que tener cuidado en las unidades ya que por lo general este dato se encuentra en mili darcies, (1 d = 1000 md). Comumente la permeabilidad al vapor es muy similar a la permeabilidad al aire por lo que tomar como dato este último valor será una muy buena aproximación si no se cuenta con la información adecuada.

- Densidad del aceite (grados API). es la densidad API del aceite a temperatura original de yacimiento. Aunque este dato se introduce en grados API en el programa se maneja como lbm/pie^3 .

4.- Gasto determinado de inyección (bl/día).

Es posible que se tenga un gasto de inyección determinado - que puede estar limitado por las condiciones y equipo con que se cuente - para el cual se requiera calcular el desplazamiento; o también las condiciones de presión y temperatura de inyección. Si es ese el caso, deberá contestarse "SI" a la pregunta:

Desea utilizar un gasto de inyección determinado (SI/NO) :?

SI

Con esto el programa requerirá como dato dicho gasto, determinado en (bl/día):

Gasto de inyección determinado (bl/día) = ?

En caso negativo el programa calculará el gasto óptimo de inyección de vapor.

5.- No. de variaciones del 10% mayores y menores.

Si en esta parte se introduce un número del 1 al 10 se obtendrán resultados para ese número de incrementos (variaciones mayores) y/o decrementos - (variaciones menores) con respecto al gasto óptimo calculado o al gasto de inyección determinado, según el caso. Por ejemplo, si el gasto óptimo calculado es de 100 (bl/día) y se desean 2 incrementos deberá contestarse:

No. de variaciones del 10, mayores y menores = 12

y con lo anterior se obtendrán resultados para el 80, 90, 110 y 120 % del gasto óptimo, para este ejemplo; 96, 108, 132, y 144 (bl/día).

Si no se desea ninguna variación entonces teclear el número cero (0). Si se da una respuesta diferente a la anterior (de cero a diez), se marcará un error y será necesario contestar nuevamente.

6.- Cálculo del comportamiento del desplazamiento.

Si se corrió la FASE 1, al finalizar se preguntará si se desean los cálculos para el comportamiento del desplazamiento, es decir correr la FASE 2. En pantalla aparecerá:

Desea el comportamiento del desplazamiento (SI/NO): ?

En caso afirmativo (contestar SI) se tomarán como datos los resultados de la FASE 1 y empezará a correr la FASE 2 cuyas indicaciones se encuentran más adelante. Ahora bien, en caso negativo (contestar NO) se dará por terminada la presente corrida y se preguntará si se desea seguir usando el programa. Acerca de esto último las indicaciones y opciones que presenta están más adelante.

Para la FASE 2 se tienen las siguientes indicaciones:

En caso de que no se haya corrido la FASE 1 será necesario introducir como datos, además de los que se describen más adelante, los datos de:

- i) Nombre del campo.
- ii) Ubicación.
- iii) Usuario del programa.
- iv) Gasto de inyección de vapor.
- v) Presión de inyección de vapor.
- vi) Temperatura de inyección de vapor.

Si se corrió la FASE 1 los datos anteriores se tomarán de dicha parte del programa.

Los siguientes datos son necesarios para poder correr la FASE 2 y se solicitarán independientemente de si se corrió o no la FASE 1, dichos datos son:

- Temperatura de la formación (grados F). Se refiere a la temperatura media del intervalo por el cual se inyectará vapor. Esta temperatura es la que se tiene en la formación antes de iniciar la inyección.
- Porosidad de la formación (fracc.). Es la porosidad efectiva de la formación -poros comunicados - y deberá introducirse en forma de fracción, por ejemplo, si la porosidad es del 20% deberá introducirse 0.20 ó .2, cualquiera de los 2 respuestas anteriores es válida para este ejemplo.
- Saturación Inicial de aceite (fracc.). Es la saturación de aceite en la formación al iniciarse el proceso de inyección de vapor . Se maneja en forma de fracción.

- Saturación residual de aceite (fracc.). Es la saturación de aceite inmóvil o irreductible, es decir de aceite no recuperable. También se maneja en forma de fracción.

- Saturación inicial de gas (fracc.). Es la saturación de gas en la formación al inicio de la inyección de vapor también se maneja en forma fraccionaria.

Los cuatro datos anteriores se revisan en forma automática.

- Conductividad térmica de la roca (BTU/pie-hr-°F).

En caso de no conocer este dato deberá contestarse:

Conoce la conductividad térmica de la roca (SI/NO): ? NO

y con lo anterior el programa utilizará una correlación para calcular dicho dato. Si se tiene como dato la conductividad térmica de la roca entonces deberá contestarse SI o introducir el dato. Un rango común para las unidades requeridas es 1.0 a 2.0, si el dato con que se cuenta se sale de ese rango, es conveniente hacer un análisis de unidades para asegurar la veracidad del valor.

- Viscosidad inicial del aceite (cp). Es la viscosidad del aceite, al iniciar la inyección, a temperatura de formación.

- Capacidad térmica de la zona de vapor (BTU/pie-°F). En caso de no contar con este dato se puede utilizar la ecuación (II.35).

- Espesor bruto de la formación (pies). Es el espesor total de la formación a la cual se va a inyectar vapor. Desde luego debe ser mayor o igual al espesor neto.

- Area efectiva del patrón de pozos (acres). Es el área del patrón de inyección y depende del arreglo de los pozos. Cada campo tiene varios patrones de inyección y tanto los datos como los resultados de el presente programa estan referidos a un patrón, o sea, a un pozo inyector.

8.- Punto límite del desplazamiento.

Existen 2 opciones para poner límite al desplazamiento de aceite:

1) Una relación instantánea aceite producido/vapor inyectado. Esta relación es igual al gasto de aceite producido (bl/día) entre el gasto de vapor inyectado (bl/día). Esta es la primera opción que se presenta y se refiere a la relación límite que sea económicamente rentable. Si se desea una relación límite deberá contestarse:

Desea una relación instantánea aceite/vapor límite (SI/NO) : ? SI
y a continuación teclear la relación que se desea, por ejemplo si fosi límite = 0.2 entonces se tendrá:

Relación instantánea aceite vapor límite = ? 0.20 ó .2

En caso de no conocer cual es la Fosi límite económicamente rentable contestar NO.

ii) La segunda opción presentada es cuando se tiene un tiempo límite de inyección (en años) para el desplazamiento. Como este dato es absolutamente necesario, se deberá teclear alguna respuesta diferente de cero.

Por ejemplo:

Tiempo límite de desplazamiento (años) = ? 7

Al alcanzar el tiempo límite se detendrá la corrida y se imprimirá el mensaje correspondiente.

Independientemente del límite que se tenga para el desplazamiento, si en algún caso el volumen de aceite producido es mayor que el aceite original in-situ; al iniciar la inyección continua de vapor, el programa dará por terminado el desplazamiento y por lo tanto la corrida con el mensaje correspondiente.

9.- Intervalos de tiempo (años).

Estos intervalos serán los incrementos de tiempo utilizados en cada iteración del proceso de cálculo. Mientras menores sean los incrementos, los resultados serán más exactos. Sin embargo, por necesidades de tiempo, se recomienda utilizar intervalos de 0.1 años ó 0.08333 años (1 mes) con lo que se obtendrán resultados confiables y en poco tiempo de procesamiento.

Para CORRER NUEVAMENTE EL PROGRAMA las indicaciones necesarias son las siguientes:

10.- Opciones para una nueva corrida.

Es posible que se desee una nueva corrida del programa. En caso de ser así se debe contestar:

Desea correr nuevamente el programa (SI/NO) ? SI

y con la respuesta anterior se tendrán las diferentes opciones presentadas más adelante. En caso de contestar negativamente (NO) el programa imprimirá el nombre del usuario y dará por terminada la sesión.

Las opciones que se tienen para una nueva corrida son:

- Correr nuevamente la FASE 1.

Si se desea correr la FASE 1 deberá contestarse:

Que parte desea correr (1 o 2) ? 1

y con ésto, se presentará la pregunta:

Desea cambiar algún dato (SI/NO) ?

Aquí es muy importante hacer notar que si no se ha corrido la FASE 1 - en la sesión actual si se contesta negativamente (NO) se tendrá un error fatal, del cual no es posible recuperarse.

En caso de haber corrido anteriormente la FASE 1 la respuesta negativa (NO) llevará a ejecutar nuevamente el programa con los mismos datos. Esto es útil cuando se desea una o más copias de los resultados. Cuando se responde afirmativamente se tienen las siguientes opciones a elegir:

Las opciones son:

- 1) Datos de la prueba de inyectabilidad
- 2) Espesor neto de la formación.
- 3) Calidad del vapor inyectado.
- 4) Permeabilidad relativa al vapor.
- 5) Densidad del aceite.
- 6) Gasto determinado de vapor.
- 7) Todos los datos.

Cual opción elige ?

Al elegir cualquiera de las opciones anteriores se requerirá introducir el dato nuevo, además se podrá elegir otra(s) opción(es) hasta completar los cambios necesarios. Al terminar dichos cambios se debe contestar:

Desea cambiar otro dato ? NO

y el programa correrá la FASE 1 con los nuevos datos proporcionados.

Cabe hacer notar que en esta parte se realizan las mismas revisiones automáticas que en el programa principal.

- Correr nuevamente la FASE 2.

Para correr otra vez la FASE 2 se debe responder:

Que parte desea correr ? 2

con la respuesta anterior se tendrá la posibilidad de cambiar datos con:

Desea cambiar algun dato (SI/NO) ? SI

lo que llevará a un procedimiento similar al de correr nuevamente la

FASE 1. Las opciones que se presentan en esta parte son :

- 1) Gasto de inyección de vapor.
- 2) Presión de inyección de vapor.
- 3) Temperatura de inyección de vapor.
- 4) Temperatura de la formación.
- 5) Porosidad de la formación.
- 6) Saturación inicial de aceite.
- 7) Saturación residual de aceite.
- 8) Saturación inicial de gas.
- 9) Conductividad térmica de la roca.
- 10) Viscosidad inicial del aceite.
- 11) Capacidad térmica de la zona de vapor.
- 12) Espesor bruto de la formación.
- 13) Area efectiva del patrón de pozos.
- 14) Espesor neto de la formación.
- 15) Calidad del vapor inyectado.
- 16) Permeabilidad relativa al vapor.
- 17) Densidad del aceite.
- 18) Todos los datos.

El manejo de estas opciones es análogo al de las opciones para la FASE 1.

Factores de conversión.

$$\text{Acre} \times 4.046873 \text{ E } +03 = \text{m}^2$$

$$^\circ \text{API}, 141.5 / (131.5 + ^\circ \text{API}) = \text{g/cm}^3$$

$$\text{bls} \times 1.589873 \text{ E } -01 = \text{m}^3$$

$$\text{BTU} \times 1.055056 = \text{KJ}$$

$$\text{cp} \times 1.0 \text{ E}-03 = \text{Pa-s}$$

$$\text{pie}^3 \times 2.831685 \text{ E}-02 = \text{m}^3$$

$$^\circ \text{F}, (^\circ \text{F} - 32) / 1.8 = ^\circ \text{C}$$

$$\text{pie} \times 3.048 \text{ E}-01 = \text{m}$$

$$\text{lbm} \times 4.535924 \text{ E}-01 = \text{Kg}$$

$$\text{lb/pg}^2 \times 6.894757 = \text{KPa}$$

CAPITULO IV

EJEMPLOS DE APLICACION .

Los ejemplos de aplicación aquí presentados deben servir como una guía para el usuario que desee correr el programa de cómputo. No obstante, es el mismo usuario quién podrá aplicar los resultados de el programa para algún problema específico que se le presente como puede ser un análisis de sensibilidad de los diferentes factores que intervienen en el desplazamiento por inyección continua de vapor, un análisis económico, etc.

Ejemplo de aplicación 1.

Las pruebas iniciales de inyectividad de un pozo inyector nuevo indican que se tiene una relación de flujo geométrica con 150 bl/día a 150 lb/pg² abs y 200 bl/día a 200 lb/pg² abs. El análisis de muestras en laboratorio y la interpretación de registros geofísicos dan como resultados: $K_{aire} = K_s = 2$ darcies, $h_n = 55$ pies, y una densidad del aceite a temperatura de formación de 13.8 °API. La calidad del vapor en la cara de la formación se calculó en 65 %. ¿Cuál es el gasto de inyección óptimo y la eficiencia de barrido vertical para estas condiciones ? ¿ Que efectos se tienen con un gasto de inyección 30 % mayor ó menor ?

Para las condiciones anteriores se debe introducir como datos lo siguiente:

Presión de inyección de vapor 1	[lb/pg ² abs]	= ?	<u>150</u>
Presión de inyección de vapor 2	[lb/pg ² abs]	= ?	<u>200</u>
Gasto de inyección de vapor 1	[bl/día]	= ?	<u>150</u>
Gasto de inyección de vapor 2	[bl/día]	= ?	<u>200</u>
Rel. de flujo de la prueba (lineal = 1, geom. = 2)		= ?	<u>2</u>
Espesor neto de la formación	[pies]	= ?	<u>55</u>
Calidad del vapor inyectado	[frac.]	= ?	<u>0.65</u>
Permeabilidad relativa al vapor	[darcies]	= ?	<u>2</u>
Densidad del aceite	[grados API]	= ?	<u>13.8</u>

Desea utilizar un gasto de inyección determinado ? NO

No. de variaciones del 10 % mayores y menores ? 2

con los datos anteriores se obtendrán como resultados :

+++++ F. A S E I +++++
+++++

----- D A T O S -----

Prueba de inyección

Presion = 150 [lb/pg² abs] Gasto = 150 [bl/dia]
Presion = 200 [lb/pg² abs] Gasto = 200 [bl/dia]

Relacion de flujo = GEOMETRICA

Espesor neto de la formacion = 55 [pies]
Calidad del vapor inyectado = 65 %
Permeabilidad al vapor = 2 [darcies]
Densidad del aceite = 13.8 [grados API]

----- R E S U L T A D O S -----

Gasto optimo calculado de inyeccion de vapor = 245 [bl/dia]
Eficiencia vertical maxima = .1776489
Presion de inyeccion del vapor = 259.1044 [lb/pg² abs]
Temperatura de inyeccion del vapor = 401.8399 [grados F]

----- RESULTADOS VARIANDO EL GASTO -----

Diferencia de gasto = - 10 %
 Gasto de inyeccion = 220.5 [bl/dia]
 Presion de inyeccion = 225.0375 [lb/pg2 abs]
 Temperatura de inyeccion = 309.3432 [grados F]
 Eficiencia vertical = .1769965

Diferencia de gasto = - 20 %
 Gasto de inyeccion = 196 [bl/dia]
 Presion de inyeccion = 195.4477 [lb/pg2 abs]
 Temperatura de inyeccion = 377.1882 [grados F]
 Eficiencia vertical = .1750049

Diferencia de gasto = - 30 %
 Gasto de inyeccion = 171.5 [bl/dia]
 Presion de inyeccion = 169.752 [lb/pg2 abs]
 Temperatura de inyeccion = 365.4127 [grados F]
 Eficiencia vertical = .1714191

Diferencia de gasto = + 10 %
 Gasto de inyeccion = 269.5 [bl/dia]
 Presion de inyeccion = 298.3285 [lb/pg2 abs]
 Temperatura de inyeccion = 414.841 [grados F]
 Eficiencia vertical = .1771623

Diferencia de gasto = + 20 %
 Gasto de inyeccion = 294 [bl/dia]
 Presion de inyeccion = 343.4905 [lb/pg2 abs]
 Temperatura de inyeccion = 428.2093 [grados F]
 Eficiencia vertical = .1757141

Diferencia de gasto = + 30 %
 Gasto de inyeccion = 318.5 [bl/dia]
 Presion de inyeccion = 395.4893 [lb/pg2 abs]
 Temperatura de inyeccion = 442.0085 [grados F]
 Eficiencia vertical = .1734467

Desea el comportamiento del desplazamiento (SI/NO) ? NO

Hasta aquí se tienen los resultados de las primeras dos preguntas.

Ahora, debido a las condiciones de equipo con que se cuenta se decidió inyectar vapor a un gasto de 300 bl/día, para las mismas condiciones de yacimiento.

¿ Cuáles son las condiciones de presión y temperatura de inyección para dicho gasto determinado, así como la eficiencia de barrido vertical ? ¿ Cuál será el comportamiento del desplazamiento y cuánto tiempo tardará en alcanzarse la relación instantánea límite aceite producido/vapor inyectado de 0.20 ?

Otros datos con los que se cuenta son :

Patrón de 5 pozos con un área de 1.5 acres.

$h_t = 64$ pies ; $\bar{U} = 32\%$; $S_{oi} = 55\%$; $S_{or} = 15\%$;

$kh = 1.34$ BTU/pie-hr-°F ; $M_1 = 33.8$ BTU/pie³-°F ;

$S_g = 20\%$; $\rho_i = 350$ cp ; $T_{for} = 90$ °F

Con los datos anteriores se debe proseguir la corrida del programa de la siguiente manera:

Desea correr nuevamente el programa (SI/NO) ? SI

Que parte desea correr (1 o 2) ? 1

Desea cambiar algún dato (SI/NO) ? SI

Cuál opción elige ? 6

Gasto de inyección determinado [bl/día] ? 300

+++++ F A S E 1 +++++
+++++

----- D A T O S -----

Prueba de inyeccion

Presion = 150 [lb/pg² abs] Gasto = 150 [bl/día]
Presion = 200 [lb/pg² abs] Gasto = 200 [bl/día]

Relacion de flujo = GEOMETRICA

Espesor neto de la formacion = 55 [pies]
Calidad del vapor inyectado = 65 %
Permeabilidad al vapor = 2 [darcies]
Densidad del aceite = 13.8 [grados API]

----- R E S U L T A D O S -----

Gasto determinado de inyeccion de vapor = 300 [bl/día]
Eficiencia vertical maxima = .1752296
Presion de inyeccion del vapor = 355.5555 [lb/pg² abs]
Temperatura de inyeccion del vapor = 431.5483 [grados F]

----- RESULTADOS VARIANDO EL GASTO -----

Diferencia de gasto = -
 Gasto de inyeccion = 270 [bl/dia]
 Presion de inyeccion = 299.188 [lb/pg2 abs]
 Temperatura de inyeccion = 415.1095 [grados F]
 Eficiencia vertical = .1771418

Diferencia de gasto = - 20 %
 Gasto de inyeccion = 240 [bl/dia]
 Presion de inyeccion = 251.7567 [lb/pg2 abs]
 Temperatura de inyeccion = 399.297 [grados F]
 Eficiencia vertical = .1776124

Diferencia de gasto = - 30 %
 Gasto de inyeccion = 210 [bl/dia]
 Presion de inyeccion = 211.8448 [lb/pg2 abs]
 Temperatura de inyeccion = 384.0867 [grados F]
 Eficiencia vertical = .1763206

Diferencia de gasto = + 10 %
 Gasto de inyeccion = 330 [bl/dia]
 Presion de inyeccion = 422.5427 [lb/pg2 abs]
 Temperatura de inyeccion = 448.6382 [grados F]
 Eficiencia vertical = .1721353

Diferencia de gasto = + 20 %
 Gasto de inyeccion = 360 [bl/dia]
 Presion de inyeccion = 502.1505 [lb/pg2 abs]
 Temperatura de inyeccion = 466.4047 [grados F]
 Eficiencia vertical = .1680715

Diferencia de gasto = + 30 %
 Gasto de inyeccion = 390 [bl/dia]
 Presion de inyeccion = 596.7565 [lb/pg2 abs]
 Temperatura de inyeccion = 484.8748 [grados F]
 Eficiencia vertical = .1632133

y se debe continuar con :

Desea el comportamiento del experimento (SI/NO) ? SI

Temperatura de la formación [grados F] = ? 90

Porosidad de la formación [fracc.] = ? 0.32

Saturación inicial de aceite [fracc.] = ? 0.55

Saturación residual de aceite [fracc.] = ? 0.15

Saturación inicial de gas [fracc.] = ? 0.20

Conoce la conductividad térmica de la roca (SI/NO) ? SI

Conductividad térmica de la roca [BTU/pie-hr-°F] = ? 1.34

Viscosidad inicial del aceite a temp. de for. [cp] = ? 350

Capacidad térmica de la zona de vapor [BTU/pie³-°F] = ? 33.8

Espesor bruto de la formación [pies] = ? 65

Area efectiva del patrón de pozos [acres] = ? 1.5

Desea una rel. inst. aceite/vapor límite (SI/NO) ? SI

Rel. inst. aceite/vapor límite = ? 0.20

Tiempo límite de desplazamiento [años] = ? 4

Intervalos de tiempo [años] = ? 0.1

con lo anterior se obtendrán para la FASE 2 los siguientes resultados :

+++++++ F A S E 2 ++++++
 ++++++

----- D A T O S -----

Nombre del campo	= EJEMPLO
Gasto de inyeccion de vapor	= 300 [bl/dia]
Saturacion inicial de aceite	= 55 %
Saturacion residual de aceite	= 15 %
Saturacion inicial de gas	= 20 %
Conductividad termica de la roca	= 1.34 [BTU/pie-hr-F]
Viscosidad inicial del aceite	= 350 [cp]
Cap. termica de la zona de vapor	= 33.8 [BTU/pie ³ -F]
Densidad del aceite	= 13.8 [grados API]
Area efectiva del patron de pozos	= 1.5 [acres]
Espesor neto de la formacion	= 55 [pies]
Permeabilidad relativa al vapor	= 2 [darcies]
Calidad del vapor inyectado	= 65 %

----- R E S U L T A D O S -----

Aceite original in-situ = 112542.8 [bls]

Tiempo de inyeccion	= .1 [años]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.	= 5.642157E-04
Tamaño de la zona de vapor	= 7.494578E-02 [acres]
Eficiencia termica promedio	= .8681805
Aceite producido	= 6.178162 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo	= .1692647 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.	= 5.642157E-04

Tiempo de inyeccion = .2 [años]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 7.809409E-03
Tamaño de la zona de vapor = .1419635 [acres]
Eficiencia termica promedio = .8223766
Aceite producido = 85.51302 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 2.172558 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= 7.245193E-03

Tiempo de inyeccion = .3 [años]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 3.943359E-02
Tamaño de la zona de vapor = .2046173 [acres]
Eficiencia termica promedio = .7901033
Aceite producido = 431.7976 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 9.487253 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= 3.162418E-02

Tiempo de inyeccion = .4 [años]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= .1168659
Tamaño de la zona de vapor = .2640297 [acres]
Eficiencia termica promedio = .7646375
Aceite producido = 1279.682 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 23.2297 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= 7.743231E-02

Tiempo de inyeccion = .5 [años]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= .2259949
Tamaño de la zona de vapor = .320878 [acres]
Eficiencia termica promedio = .7434174
Aceite producido = 2474.644 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 32.73871 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .109129

Tiempo de inyeccion = .6 [años]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= .3693292
Tamaño de la zona de vapor = .3755894 [acres]
Eficiencia termica promedio = .725145
Aceite producido = 4044.154 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 43.00027 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .1433342

Tiempo de inyeccion = .7000001 [años]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= .5486720
Tamaño de la zona de vapor = .4284653 [acres]
Eficiencia termica promedio = .7090559
Aceite producido = 6007.967 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 53.80308 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .1793436

Tiempo de inyeccion = .8000001 [años]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= .7652435
Tamaño de la zona de vapor = .4797339 [acres]
Eficiencia termica promedio = .6946615
Aceite producido = 8379.415 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 64.9712 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2155706

Tiempo de inyeccion = .9000001 [años]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 1.019739
Tamaño de la zona de vapor = .5295731 [acres]
Eficiencia termica promedio = .6816261
Aceite producido = 11166.15 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 76.34878 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2544959

Tiempo de inyeccion = 1 [años]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 1.291224
Tamaño de la zona de vapor = .5781263 [acres]
Eficiencia termica promedio = .6697081
Aceite producido = 14138.9 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 81.4454 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2714847

Tiempo de inyeccion = 1.1 [años]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 1.533409
Tamaño de la zona de vapor = .6255095 [acres]
Eficiencia termica promedio = .6587248
Aceite producido = 17009.83 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 78.6556 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2621853

Tiempo de inyeccion = 1.2 [a~os]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 1.807046
Tama~o de la zona de vapor = .6718229 [acres]
Eficiencia termica promedio = .6485395
Aceite producido = 19787.16 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 76.09111 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2536371

Tiempo de inyeccion = 1.3 [a~os]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 2.052765
Tama~o de la zona de vapor = .71715 [acres]
Eficiencia termica promedio = .6390421
Aceite producido = 22477.78 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 73.71565 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2457188

Tiempo de inyeccion = 1.4 [a~os]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 2.29112
Tama~o de la zona de vapor = .7615635 [acres]
Eficiencia termica promedio = .6301456
Aceite producido = 25087.76 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 71.50634 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2383545

Tiempo de inyeccion = 1.5 [a~os]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 2.522586
Tama~o de la zona de vapor = .8051253 [acres]
Eficiencia termica promedio = .6217776
Aceite producido = 27622.32 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 69.43996 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2314666

Tiempo de inyeccion = 1.6 [a~os]
Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 2.747594
Tama~o de la zona de vapor = .8478919 [acres]
Eficiencia termica promedio = .6138798
Aceite producido = 30086.15 [bls]
Gasto de aceite prom. del periodo = 67.50235 [bls/dia]
Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2250078

Tiempo de inyeccion = 1.7 [años]
 Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 2.966522
 Tamaño de la zona de vapor = .9972119 [acres]
 Eficiencia termica promedio = .4614627
 Aceite producido = 32493.42 [bls]
 Gasto de aceite prom. del periodo = 65.67841 [bls/día]
 Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2189281

Tiempo de inyeccion = 1.8 [años]
 Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 3.179705
 Tamaño de la zona de vapor = .9312285 [acres]
 Eficiencia termica promedio = .5993031
 Aceite producido = 34817.77 [bls]
 Gasto de aceite prom. del periodo = 63.95482 [bls/día]
 Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2131827

Tiempo de inyeccion = 1.9 [años]
 Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 3.387452
 Tamaño de la zona de vapor = .9718817 [acres]
 Eficiencia termica promedio = .5925468
 Aceite producido = 37092.61 [bls]
 Gasto de aceite prom. del periodo = 62.32448 [bls/día]
 Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2077483

Tiempo de inyeccion = 2 [años]
 Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= 3.590038
 Tamaño de la zona de vapor = 1.011906 [acres]
 Eficiencia termica promedio = .5861019
 Aceite producido = 39310.92 [bls]
 Gasto de aceite prom. del periodo = 60.77555 [bls/día]
 Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= .2025852

SE ALCANZO LA RELACION ACEITE / VAPOR LIMITE

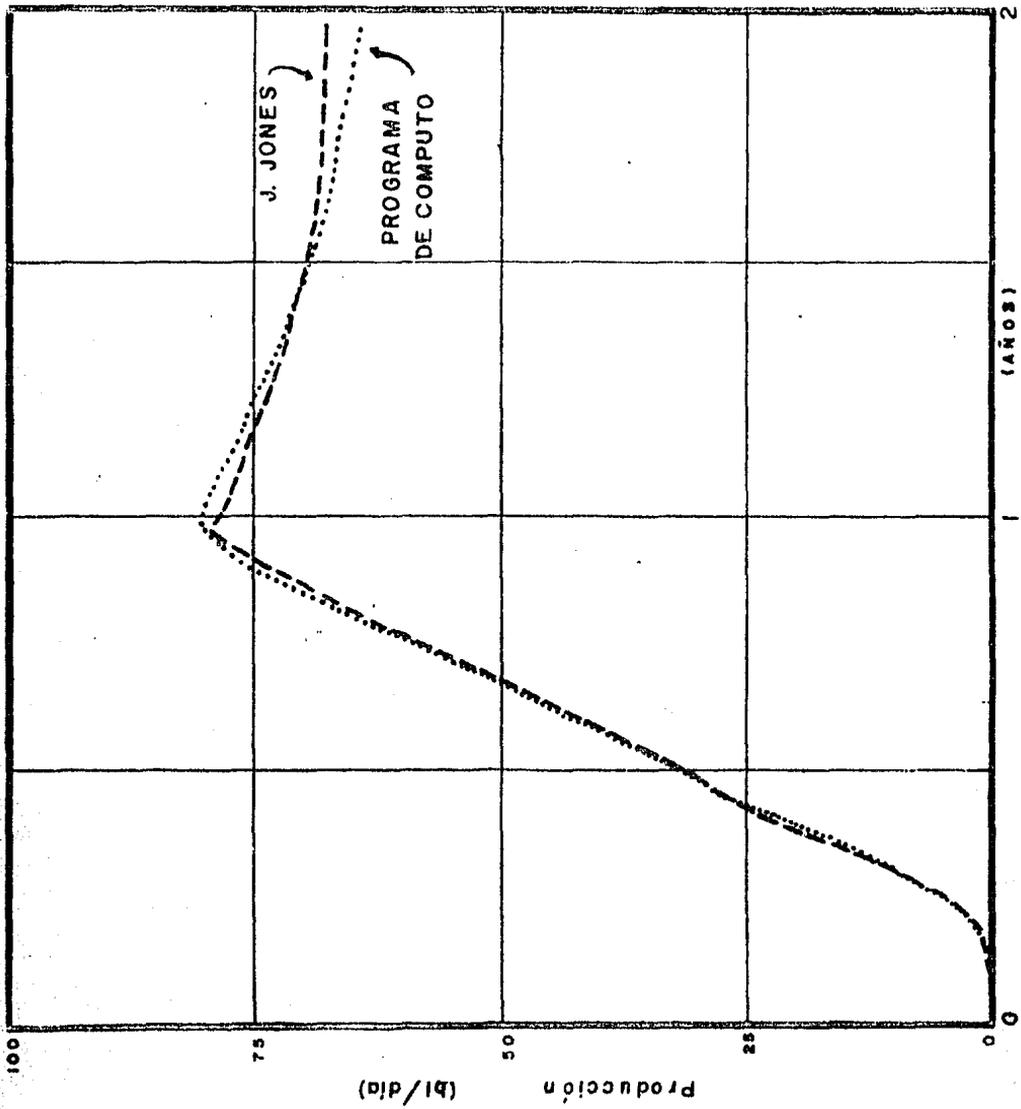


Fig. IV.1. - Gráfica comparativa, EJEMPLO I.

Para terminar la sesión, finalmente se tiene :

Desea correr nuevamente el programa (SI/NO) ? NO con lo que se imprimirá el nombre del usuario y se terminará la sesión.

Los resultados del ejemplo anterior se resumen en la gráfica IV.1, en la que también se presentan los resultados reportados por J. Jones para el mismo ejemplo. Como se podrá observar hay una cierta diferencia en el gasto después de un tiempo de inyección y esto es debido a los errores de redondeo que tienen los resultados reportados por J. Jones.

Ejemplo de aplicación 2.

Este ejemplo consta de varios campos reales que estuvieron sujetos a inyección continua de vapor y se presentan con el fin de comparar los resultados del presente programa con los obtenidos realmente en el campo. Los datos que se requieren se resumen en la tabla IV.1. Las corridas se hicieron sucesivamente en una sola sesión ya que el programa así lo permite.

Los resultados se presentan en forma de gráficas para agilizar la comparación. En tales gráficas se presentan también los resultados obtenidos en el campo.

Es necesario hacer notar que los resultados obtenidos con el programa corresponden a un solo patrón, o sea a un solo pozo inyector, -

por lo que es necesario multiplicar por el total de patrones que componen cada campo para poder hacer la comparación.

Desde luego que existen diferencias entre los resultados del programa y los obtenidos en cada proyecto, debido, en la mayoría de los casos, a que el gasto de inyección de vapor no se pudo mantener constante a causa de las razones obvias de los equipos que se utilizaron. Las diferencias también pueden deberse a las suposiciones que se hacen.

Nombre del Campo.	T _{for} °F	ht pie	hn pie	ó frac	Sg frac	Soi frac	oi cp	o °API	fs frac	ps psia	is b/d	A acre
Schoonebeek	100	83	83	0.30	0	0.85	160	25	0.70	600	1250	15
Snackover	110	70	20	0.36	0.50	0.45	75	20	0.80	390	2500	10
Slocum Fase 1	75	40	40	0.37	0	0.49	1700	19	0.70	200	1000	5.65
Inglewood	100	43	43	0.37	0	0.55	1200	14	0.70	400	1100	2.6
Tia Juana	113	200	200	0.33	0	0.75	1000	15	0.80	300	1235	8
Kern River	80	70	50	0.34	0	0.54	1500	14	0.70	200	650	6

Nota: $M_1 = 33 \text{ BTU/pie}^3\text{-}^\circ\text{F}$; $kh = 1.2 \text{ BTU/pie-hr-}^\circ\text{F}$; $Sor = 0.15$;
 $T_s = 115.1 \text{ ps}^{0.225}$. Para todos los casos.

Tabla IV.1. Datos para el ejemplo 2.

Campo SCHOONEBEEK ¹⁸.

En el caso del campo SCHOONEBEEK (figura IV.2) ubicado en el mar del Norte, se puede observar que la predicción es bastante aproximada a la producción reportada aunque varía más después de alcanzar la producción máxima y esto se debió a que se cerraron algunos pozos productores para eliminar el arenamiento y el programa no contempla este tipo de reparaciones y mantenimiento de los pozos. Una vez que los pozos fueron reparados y puestos nuevamente a producir la diferencia entre los resultados del programa y la producción reportada se redujo considerablemente.

Campo SMACKOVER ¹⁹.

La predicción del programa, en este caso, se adelantó aproximadamente 5 meses (figura IV.3). Lo más posible es que dicho adelanto sea debido a que se consideró un yacimiento homogéneo lo cual no era cierto sino por el contrario era un yacimiento bastante heterogéneo. En casos como este es necesario considerar las suposiciones que se hacen. Sin embargo, como se puede observar, una vez que el yacimiento fué calentado la producción aumentó rápida y constantemente hasta alcanzar casi la producción máxima esperada. Después de lo anterior la producción tuvo un declinamiento aproximado al esperado con la predicción.

Campo SLOCUM FASE 1 ²⁰.

En este campo la inyección continua de vapor se implementó primeramente en 7 patrones, es decir, con 7 pozos inyectoros. Después de 16 meses se incluyeron en el proyecto 5 nuevos pozos inyectoros y posteriormente 3 pozos nuevos más, teniendo un total de 15 patrones al final del proyecto. Para tomar en cuenta a los pozos nuevos, primeramente los resultados del programa se multiplicaron por 7 y cuando se añadieron los primeros 5 pozos nuevos fué necesario sumar sus producciones a las de los 7 pozos que ya estaban en operación pero tomando en cuenta que los pozos comenzaban a producir, de esta manera la suma se realizó como si los 5 pozos nuevos pertenecieran a otro proyecto con iguales condiciones. El mismo procedimiento se realizó para los 3 pozos que se incluyeron en el proyecto posteriormente.

Campo INGLEWOOD ²¹.

La aproximación en este caso fué muy buena puesto que al ser un solo patrón de inyección fué más fácil mantener el gasto de inyección de vapor casi constante. Existen ligeras variaciones debidas al cierre de algunos pozos para su mantenimiento.

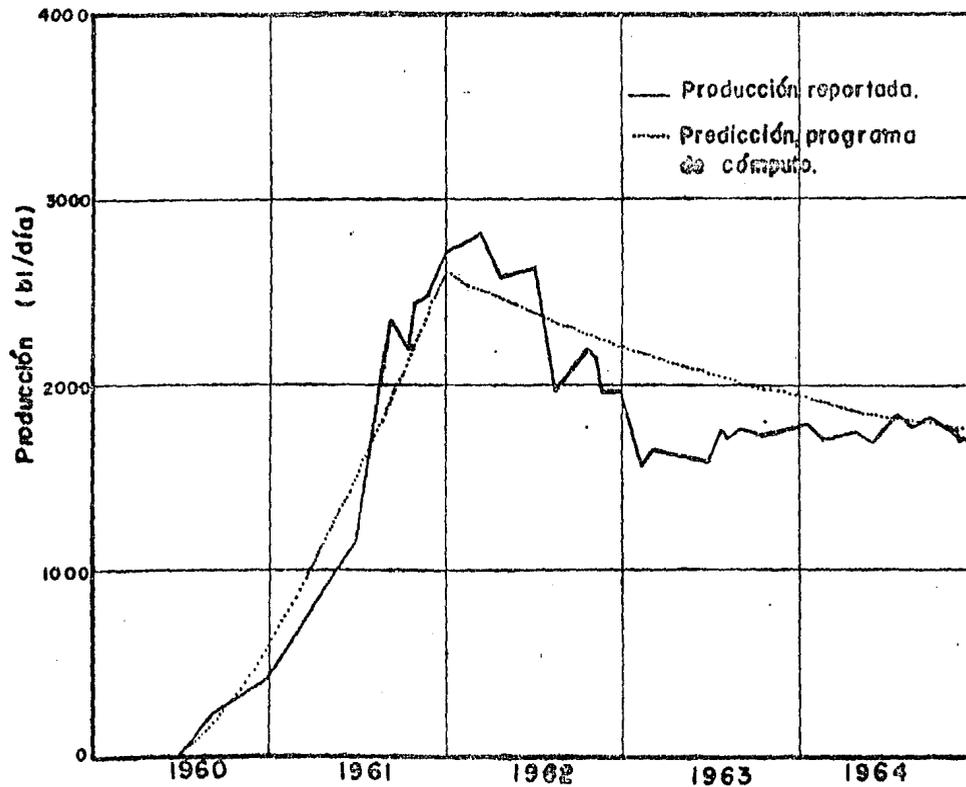


Fig. IV.2.- Campo SCHOONEBEEK.

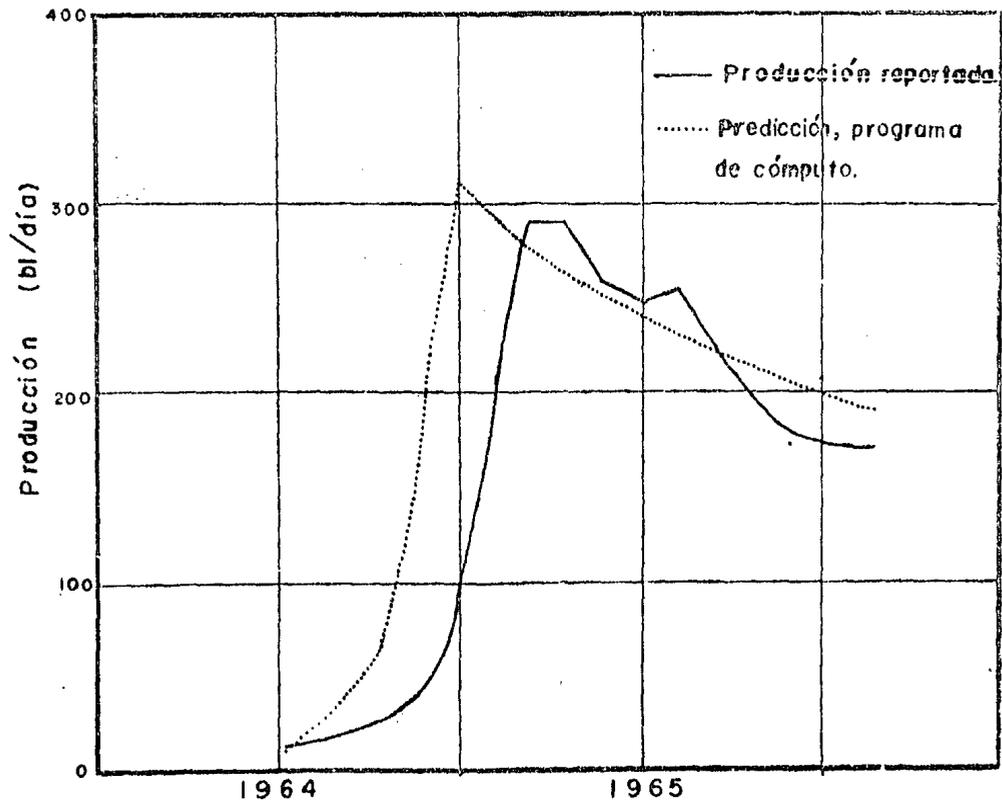


Fig. IV.3. Campo SMACKOVER.

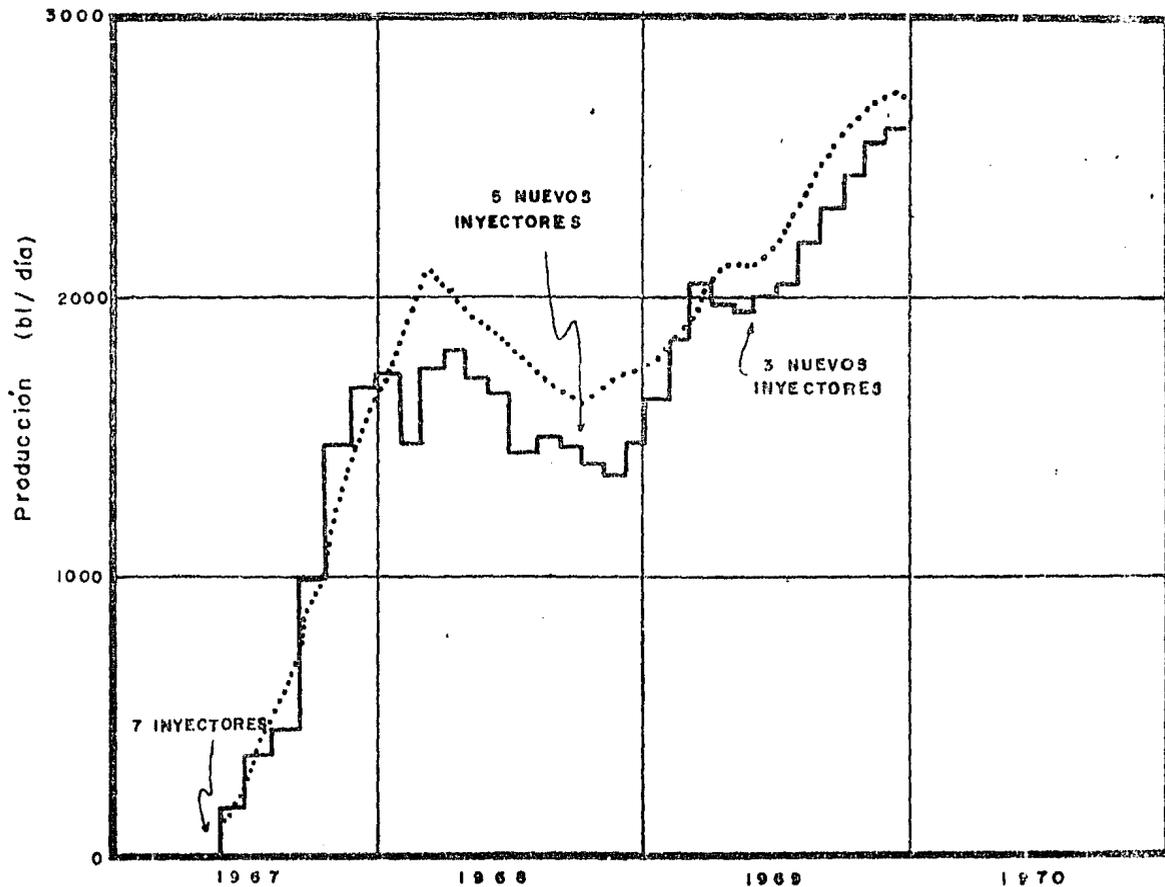


Fig. IV.4.- Campo SLOCUM FASE I.

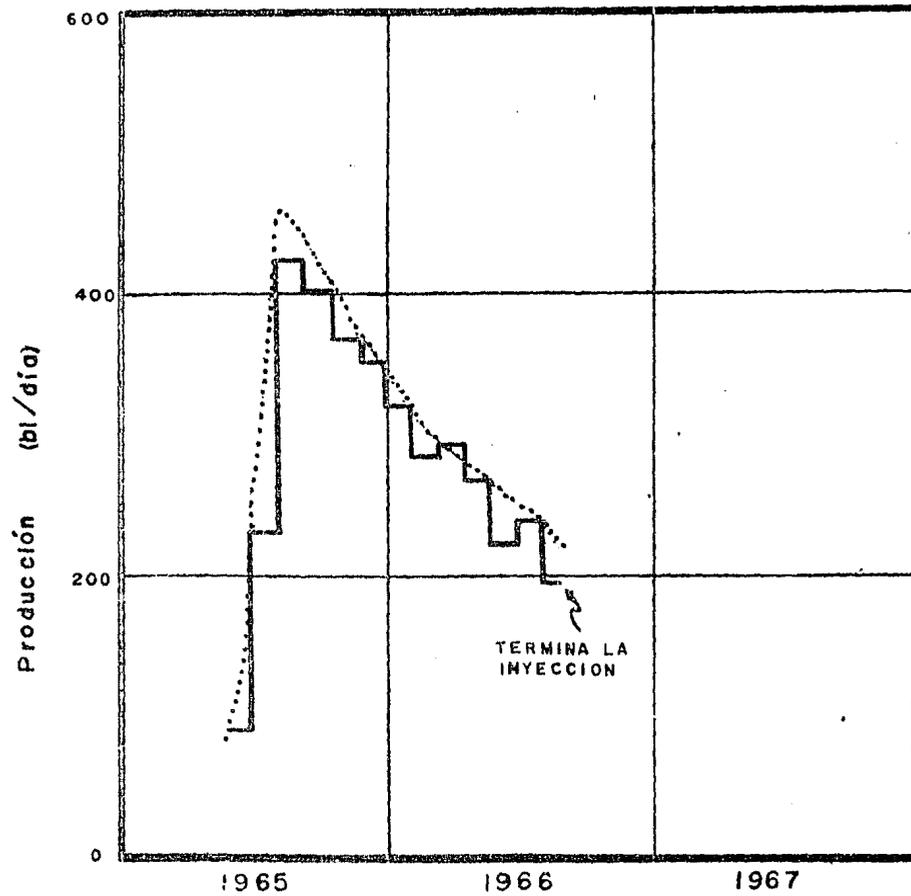


Fig. IV.5.- Campo INGLEWOOD.

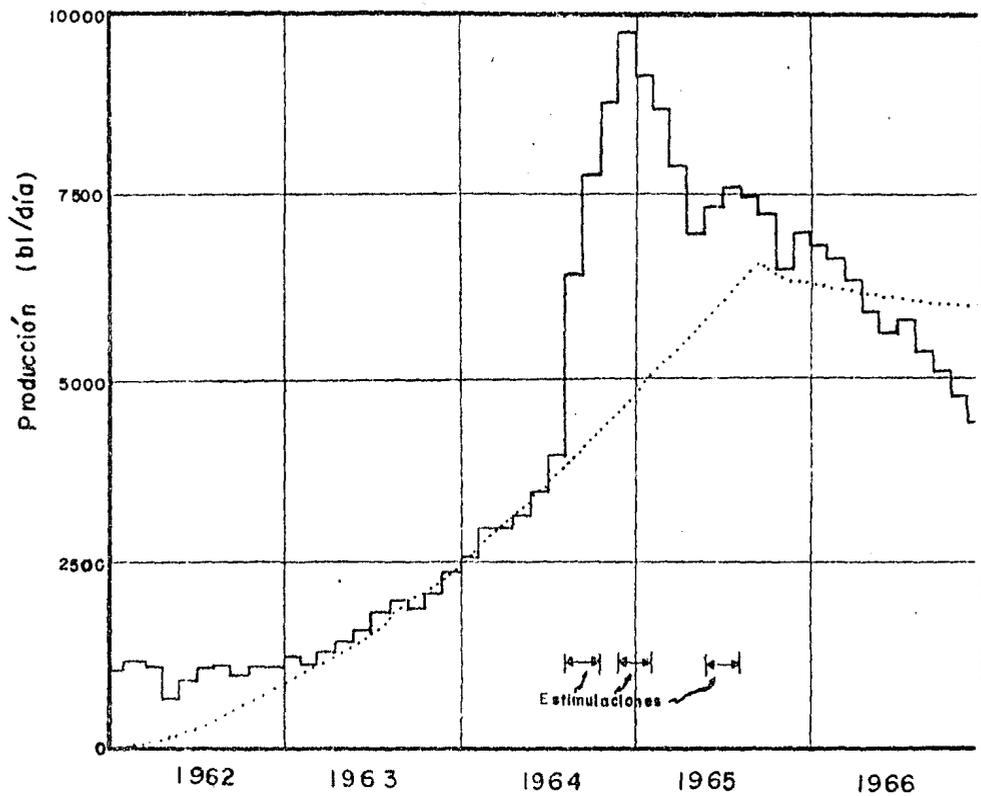


Fig. IV. 6.- Campo TIA JUANA.

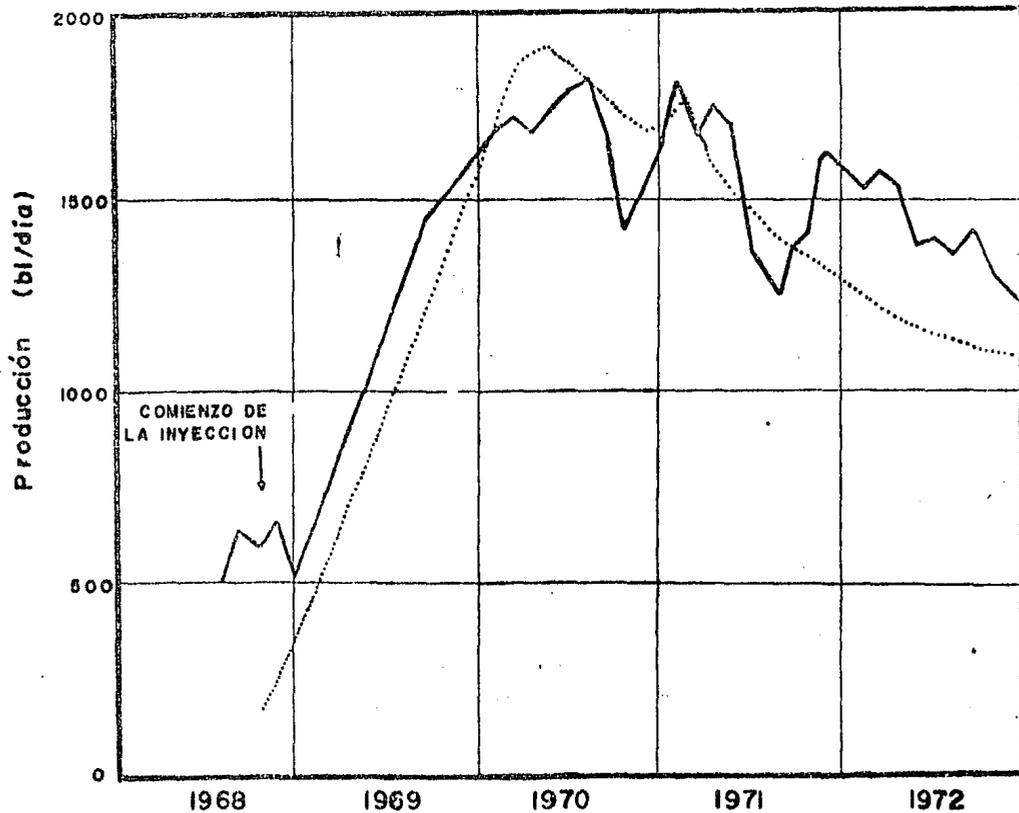


Fig. IV.7.- Campo KERN RIVER.

Ejemplo de aplicación 3.

En el campo PUSO FASE 1 se desea implementar la inyección continua de vapor. Con el fin de realizar un análisis económico se desea conocer el comportamiento del desplazamiento para patrones de 8 y 15 acres. Los datos del campo son:

$T_F = 110$ °F ; $h_t = 75$ pies ; $h_n = 55$ pies ; $\theta = 33\%$; $S_g = 0\%$;
 $S_{oi} = 58\%$; $S_{or} = 15\%$; $o_i = 280$ cp ; $\alpha = 16$ °API ;
 $F_g = 65\%$; $p_s = 200$ lb/pg² abs ; $T_s = 380$ °F ; $i_s = 2,000$ bl' dia.

En este caso primeramente se corre la FASE 2 con los datos anteriores y con:

Area del patrón de pozos (acres) ? 8

Una vez obtenidos los resultados para un patrón de 8 acres se procede con:

Desea correr nuevamente el programa (SI/NO) ? SI

Que parte desea correr (1 ó 2) ? 2

Desea cambiar algun dato (SI/NO) ? SI

Cual opción elige ? 13

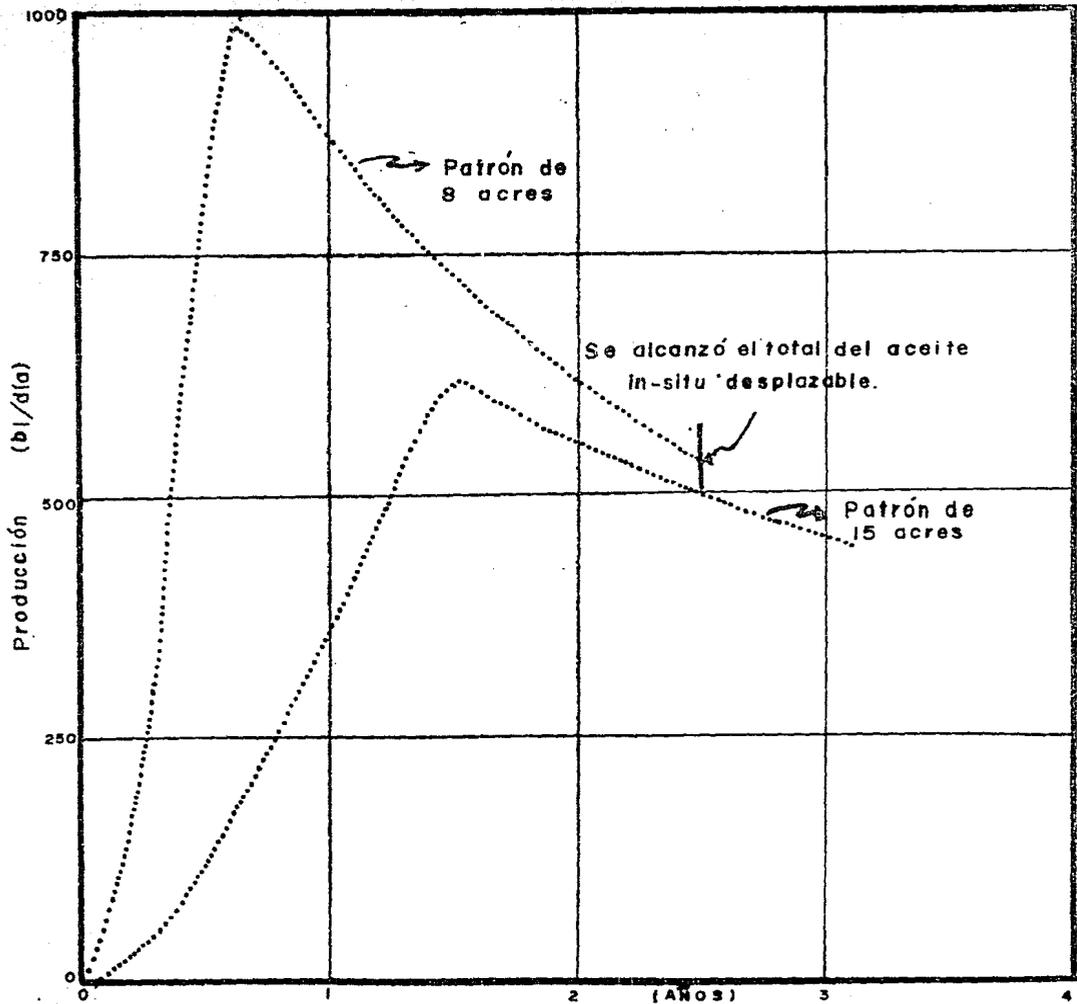
Area del patrón de pozos (acres) ? 15

Desea cambiar otro dato (SI/NO) ? NO

y con lo anterior se obtienen resultados para un patrón de pozos de 15 -
acres.

Los resultados de ambas corridas se resumen gráficamente en la figura IV,8 en la que se puede observar que el total de aceite in-situ desplazable (890 111 (bl'patrón)) se obtuvo de 2,5 años de inyección continua con un patrón de 8 acres en tanto que para el mismo tiempo se obtiene el 30% del aceite in-situ desplazable para un patrón de 15 acres con los resultados anteriores corresponde al usuario hacer el análisis económico - para determinar si conviene realizar la inversión para un patrón de 8 ó de 15 acres tomando en cuenta que para 8 acres se necesitaría el doble de - equipo y de energía para generar el vapor.

FIG. IV. 6. Campo POSO FASE I.



CONCLUSIONES

Se presenta un programa de cómputo basado en el modelo propuesto por Jeff Jones para el desplazamiento de aceite por medio de la inyección continua de vapor. Dicho programa presenta la posibilidad de calcular el gasto óptimo de inyección de vapor y las condiciones de presión y temperatura de inyección así como el comportamiento del desplazamiento de aceite, conjunta o independientemente.

El programa elaborado puede ser utilizado fácilmente, ya que, por ser de tipo conversacional, no es necesario tener grandes conocimientos de computación para llevar a cabo su ejecución.

Aunque los resultados presentados en los ejemplos de aplicación son de buena aproximación, no se debe perder de vista que el programa está basado en un modelo matemático que requiere hacer ciertas suposiciones no totalmente ciertas.

También es necesario recalcar que los resultados del programa deben usarse como una guía cuando se planea implementar la inyección continua de vapor en algún yacimiento específico, ya que la decisión final debe estar apoyada por un estudio más completo que incluya un análisis económico del proyecto, así como de la posibilidad física de llevarlo a cabo.

El uso de una microcomputadora en la realización de los cálculos lleva a la obtención de resultados en breve tiempo y con gran exactitud. Esto es muy importante cuando se tiene la necesidad de realizar los cálculos varias veces, para condiciones que difieran en uno ó más datos, en poco tiempo. Además se tiene la ventaja de poder utilizar las microcomputadoras sin necesidad de contar con instalaciones especiales.

La mayor exactitud de los datos con que se alimenta a la microcomputadora para ejecutar el programa, redundará en la obtención de resultados más confiables. No obstante, será el ingeniero petrolero quién, con su experiencia y buen juicio, seleccione y adecúe la información a las necesidades específicas que tenga.

N O M E N C L A T U R A

Variable en el programa	Variable en las ecuaciones.	Descripción
AA1, AA2	-	Resultados parciales en el cálculo de la eficiencia vertical, E_1 .
ACD	Ac_D	Tamaño adimensional de la zona de vapor, (adim.).
AEP	A	Area efectiva del patrón de pozos, (acres).
API	$^{\circ}API$	Densidad del aceite a condiciones de yacimiento, ($^{\circ}API$).
AS	As	Tamaño de la zona de vapor, (acres).
C1,C2,C3,C4	-	Constantes en el cálculo de $erfc \ t_D$.
C5,C6,C7,C8	-	Constantes en el cálculo de Ehs.
CD\$	-	Determina si se desea o no el cálculo del desplazamiento, (SI/NO).
CT\$	-	Determina si la conductividad térmica es dato o si se usa una correlación.
D	D	Difusividad térmica de la formación, (pie^2/hr).

DED	ρ_o	Densidad del aceite a condiciones de yacimiento, (lbm/pie ³)
DST	ρ_s	Densidad del vapor a temperatura de inyección, (lbm/pie ³)
DTE	Δt	Intervalos de tiempo, (años).
EE	E	Modulo de elasticidad, (lbf/pg ²)
E1I	E_I	Eficiencia vertical calculada en la primera iteración, (adim.).
E2I	E_I	Eficiencia vertical calculada en las siguientes iteraciones, (adim.).
ED	E_D	Eficiencia total del proceso expresada como una relación de energía producida/energía requerida para generar vapor, (adim.).
EVI	E_I	Eficiencia vertical, (adim.).
EHS	E_{hs}	Eficiencia térmica promedio de la zona de vapor, (adim.).
EII	$E_{I_{max}}$	Eficiencia vertical máxima obtenida.
ERFC	$\text{erfc } \sqrt{t_D}$	Función error complemento de $\sqrt{t_D}$.
FAC	-	Factor positivo o negativo cuyo valor indica incrementos o decrementos en el gasto de inyección, (1 ó -1).

FASE	..	Define la parte del programa que se desea utilizar, (1 ó 2).
FGEN	fgen	Calidad del vapor a la salida del generador, (fracc.).
FHD	Fh _D	Relación entalpía de vaporización/entalpía del líquido, (adim.).
FWH	Fwh	Calidad del vapor en la cabeza del pozo, (fracc.).
FI	ó	Porosidad de la formación, (fracc.).
FLU	-	Determina si la relación gasto/presión es lineal o geométrica, en las pruebas de <u>in</u> yectividad del vapor, (1 ó 2).
FOS	Fos	Relación acumulativa de aceite producido/agua inyectada como vapor, (adim.)
FSD	Fos'	Relación acumulativa de aceite de la zona de vapor/ agua inyectada como vapor, (adim.).
HH	-	Contador numérico del programa.
HGN	kh	Conductividad térmica de la formación, (BTU/pie-hr-°F).
HFF	hf	Entalpía del agua saturada a temperatura del vapor, (BTU/lbm).

HLTV	hfg	Calor latente de vaporización, (BTU/lbm).
HN	hn	Espesor neto de la formación, (pies).
HAT	Qiny	Gasto de inyección de calor, (BTU/hr).
HS	fs	Calidad del vapor, (fracc.).
I1S	is ₁	Gasto de inyección de vapor, 1, en la prueba de inyectividad, equivalente de agua fría, - (bl/dfa).
I2S	is ₂	Gasto de inyección de vapor, 2, en la prueba de inyectividad, (bl/dfa).
IDET	is _{det}	Gasto de inyección de vapor previamente determinado, (bl/dfa).
INC	-	Valor de los incrementos del gasto de inyección en las iteraciones.
IS	is	Gasto de inyección, variará hasta llegar al - óptimo, (bl/dfa).
ISACT	is _{opt}	Gasto óptimo de inyección de vapor, en equivalente de agua fría, (bl/dfa.).
ITER	-	Número de iteraciones hechas para llegar al - gasto óptimo.
KS	ks	Permeabilidad de la formación relativa al vapor, (darcy).

L	L.	Longitud de tubería, (pies).
M1	M1	Capacidad térmica de la zona de vapor, (BTU/pie ³ -°F).
MM	m	Factor utilizado en el cálculo de la presión de inyección, depende de la relación gasto-presión de la prueba de inyectividad, (adim.).
MUS	μ_s	Viscosidad del vapor, (cp).
NIN	-	Número de incrementos y decrementos del 10 % a partir del gasto óptimo de inyección de vapor.
NP	Np	Producción acumulativa de aceite después de iniciada la inyección, (bl/día).
ODI	Nd	Desplazamiento acumulativo de aceite, (bl/día).
OL	N	Aceite original in-situ al iniciar la inyección de vapor, (bl/día).
OSL	Fos _L	Relación aceite/vapor límite, (adim.).
P1	P ₁	Presión de inyección de vapor, 1, en la prueba de inyectividad, (lb/pg ² abs).
P2	P2	Presión de inyección de vapor, 2, en la prueba de inyectividad, (lb/pg ² abs).
PS	ps	Presión de inyección de vapor, variará hasta llegar al gasto óptimo, (lb/pg ² abs).

Q00	qod	Gasto de desplazamiento de aceite, (bl/día).
Q0	qo	Gasto de producción de aceite, (bl/día).
Q1	Q1	Pérdida de calor a través de la tubería superficial, - (BTU/hr-pie).
Q\$	-	Determina si se desea utilizar un gasto de inyección - de vapor determinado.
RISO	Fosi	Relación instantánea de aceite producido/agua inyectada como vapor, (adim.).
RI\$	-	Define si se desea o no una relación de aceite/vapor <u>lí</u> mite.
SS	S	Esfuerzo en la tubería, (lb/pg ² abs).
SBI	Sgi	Saturación de gas inicial, (fracc.).
SIO	Soi	Saturación inicial de aceite, (fracc.).
SM, SS, -		Contadores numéricos utilizados en el programa.
SU		Saturación residual de aceite, (fracc.).
SAD	Sor	
TCD	tcp	Tiempo de inyección del vapor al comenzar el transporte convectivo de calor a través del frente de condensación, (adim.).
TD	td	Tiempo adimensional de inyección de vapor (adim.).
TFOR	Tf	Temperatura de la formación, (°F).
THT	ht	Espesor bruto de la formación, (pies).

TIE	t	Tiempo de inyección del vapor, (años).
TLD	t_L	Tiempo límite de desplazamiento, (años).
TVAP	T_s	Temperatura de inyección del vapor para el gasto - óptimo de inyección, (°F).
VAR	-	Porcentaje de variación del gasto con respecto al- óptimo.
VID	μ_{oi}	Viscosidad inicial del aceite a temperatura de - formación, (cp).
VOD	V_{oD}	Volumen producido de aceite desplazado, (adim).
VPD	V_{pD}	Espacio poroso inicial llenado con vapor en forma de agua, (adim.).
VSI	$V_{s,iny}$	Volumen acumulativo de vapor inyectado, (bls).

B I B L I O G R A F I A

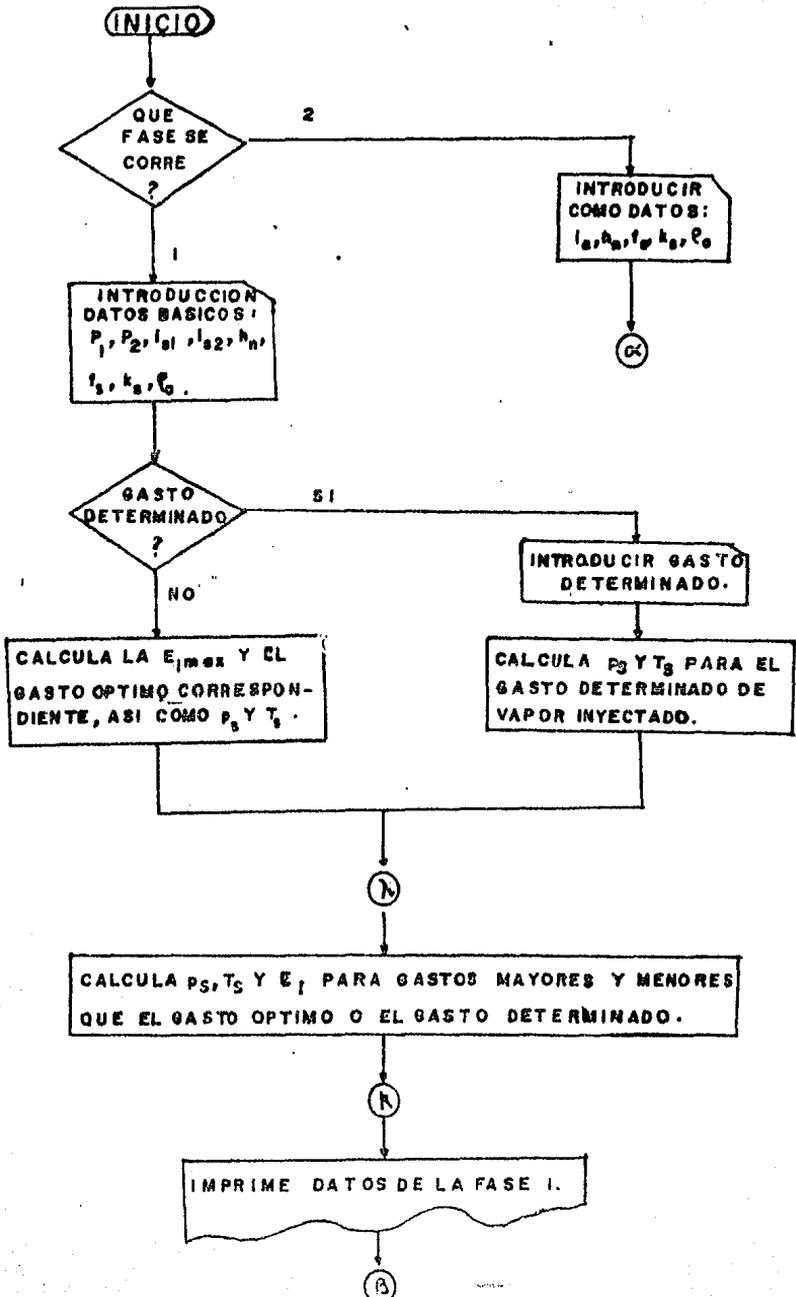
- 1.- Jones, J. : " Steam drive model for hand-held programmable calculators ".
Journal of Petroleum Technology, (Sep. 1981), 1583 - 1598.
- 2.- Van Lookeren, J. : "Calculation methods for linear and radial steam -
flow in oil reservoirs ". Paper SPE 6788, Denver, (Oct. 1977).
- 3.- Myhill, N. A. y Stegemeier, G. L. : " Steam drive correlation and predic-
tion ". Journal of Petroleum Technology, (Feb. 1978), 173 - 182.
- 4.- Marx, J. W. y Langenheim, R. H. : " Reservoir heating by hot fluid injec-
tion ". Transaction of AIME (1959) 216, 312 - 314.
- 5.- Mandl, G. y Volek, C. W. : "Heat and mass transport in steam drive pro-
cesses ". Society of Petroleum Engineers Journal, (Mar. 1969), 59 - 79.
- 6.- Neumann, C. H. : " A mathematical model of the steam drive process -apli-
cations ". Paper SPE 4757, Dallas, (Sep. 1975).
- 7.- Gomma, E. E. : " Correlations for predicting oil recovery by steamflood".
Journal of Petroleum Technology, (Feb. 1980), 325 - 332.
- 8.- Posttmann, R. H. : Secondary and tertiary oil recovery processes. Inters-
tate Oil Compact Comission, Oklahoma City (1974).

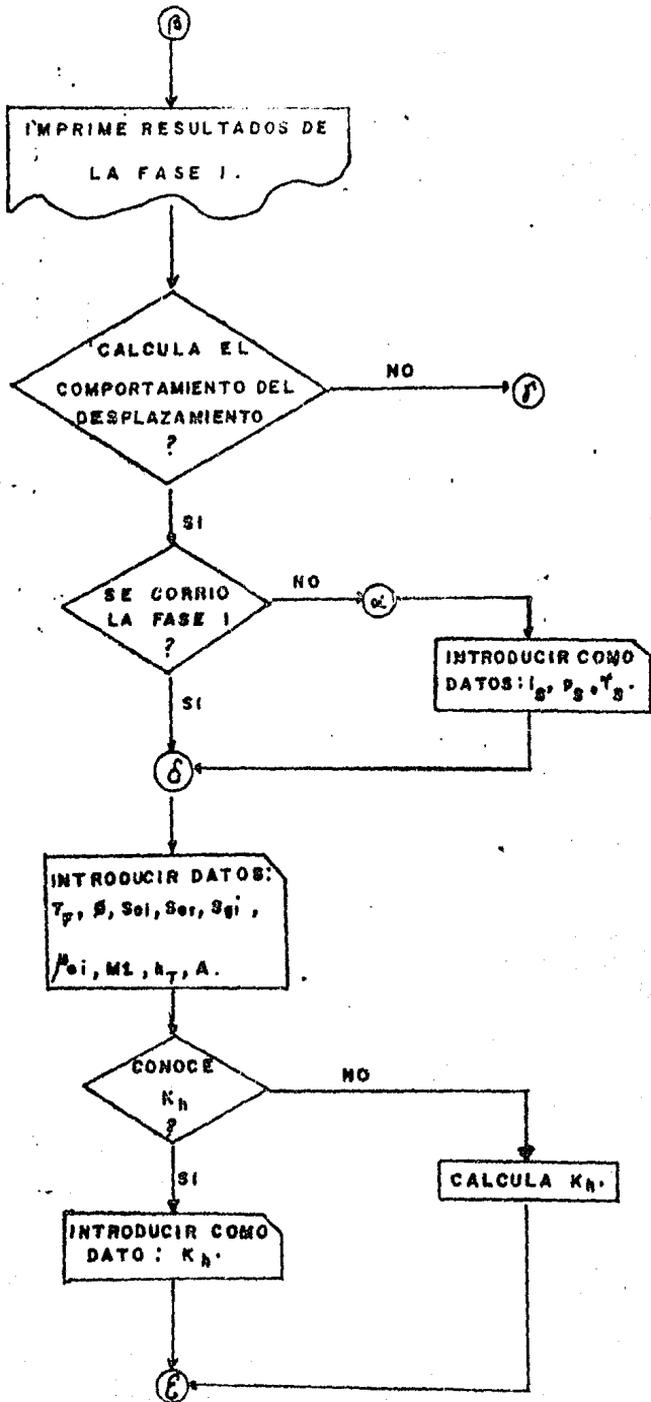
- 9.- Fanaritis, J. P. y Kimmel, J. D. : " Review of once-through steam generators ", Journal of Petroleum Technology, (Abr. 1965), 409 - 416.
- 10.- Farouq Ali, S. M. : Oil recovery by steam injection. Producer Publishing Company, Bradford, Pa. (1970), 86 - 101.
- 11.- Owens, M. E. y Bramley, B. G. : " Performance of equipments used in - high pressure steam floods ". Journal of Petroleum Technology, (Dic. - 1966), 1525 - 1531.
- 12.- Palm, J. W. y Kirkpatrick, J. W. : " Determination of steam quality using an orifice meter ". Journal of Petroleum Technology, (Jun. 1968), 587 - 591.
- 13.- Fitzgerald, B. M. : " Surface injection and producing systems for steam generators ". Producers Monthly, (Dic. 1967), 18 - 23.
- 14.- Burns, W. C. : " Water treatment for once-through steam generators ". - Journal of Petroleum Technology (Abr. 1965), 417 - 421.
- 15.- Kastrop, H. : " Thermal oil recovery ". The petroleum Publishing Company, Tulsa (1965), 18 - 21.
- 16.- Gates, C. F. y Holmes, B. G. : " Thermal well completions and operation". 6o. Congreso del petróleo Frankfurt, Alemania, (1963), 419 - 429.

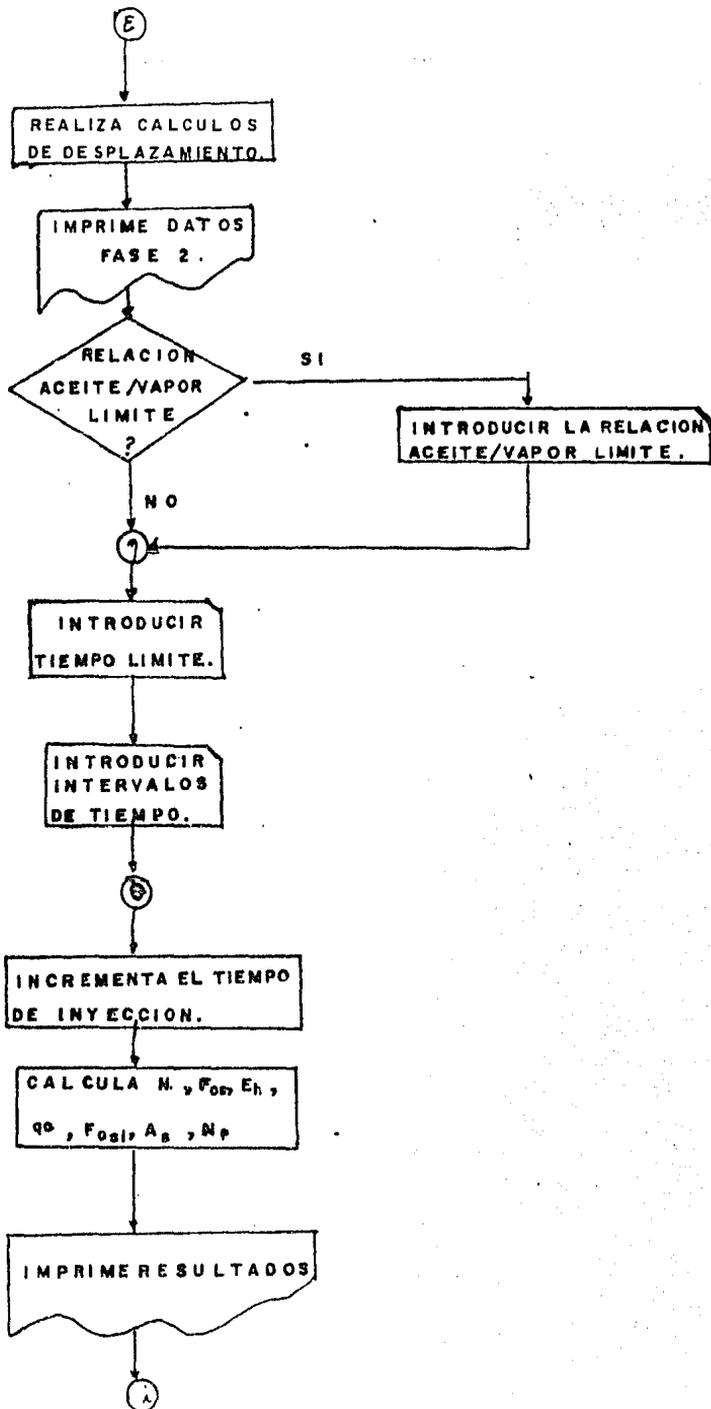
- 17.- Becerra Zapeda, M. : Recuperación Secundaria, Facultad de Ingeniería, -
U. N. A. M. (1985), Apuntes de clase.
- 18.- Van Dijk, C. : " Steam drive project in the SCHOONEBEEK field ". Jour-
nal of Petroleum Technology (Mar. 1968), 295 - 302.
- 19.- Smith, R. V., Bertuzzi, A. F., Templeton, E. E. y Campitt, R. L. : -
" Recovery of oil by steam injection in the SMACKOVER field, Arkansas ".
Journal of Petroleum Technology (Ago. 1973) 883 - 889.
- 20.- Hall, A. L. y Bowen, R. W. : " Operation and performance of the SLOCUM-
thermal recovery project, ". Journal of Petroleum Technology (Abr. 1973)
402- 408.
- 21.- Elevins, T. R., Asaltine, R. J. y Kirk, R. S. : " Analisis of a steam -
drive project, INGLEWOOD field, California ". Journal of Petroleum Tech
nology (Sep. 1969) 1141 - 1150.
- 22.- de Haan, H. J. y Schenk, L. : " Performance analisis of a major steam -
drive project in the TIA JUANA field, Western Venezuela ". Journal of -
Petroleum Technology (Ene. 1969) 111 - 119.
- 23.- Elevins, T. R. y Billingsley, R. H. : " The ten pattern steamflood, -
KERN RIVER field, California ". Journal of Petroleum Technology (Dic.-
1975) 1505 - 1514.

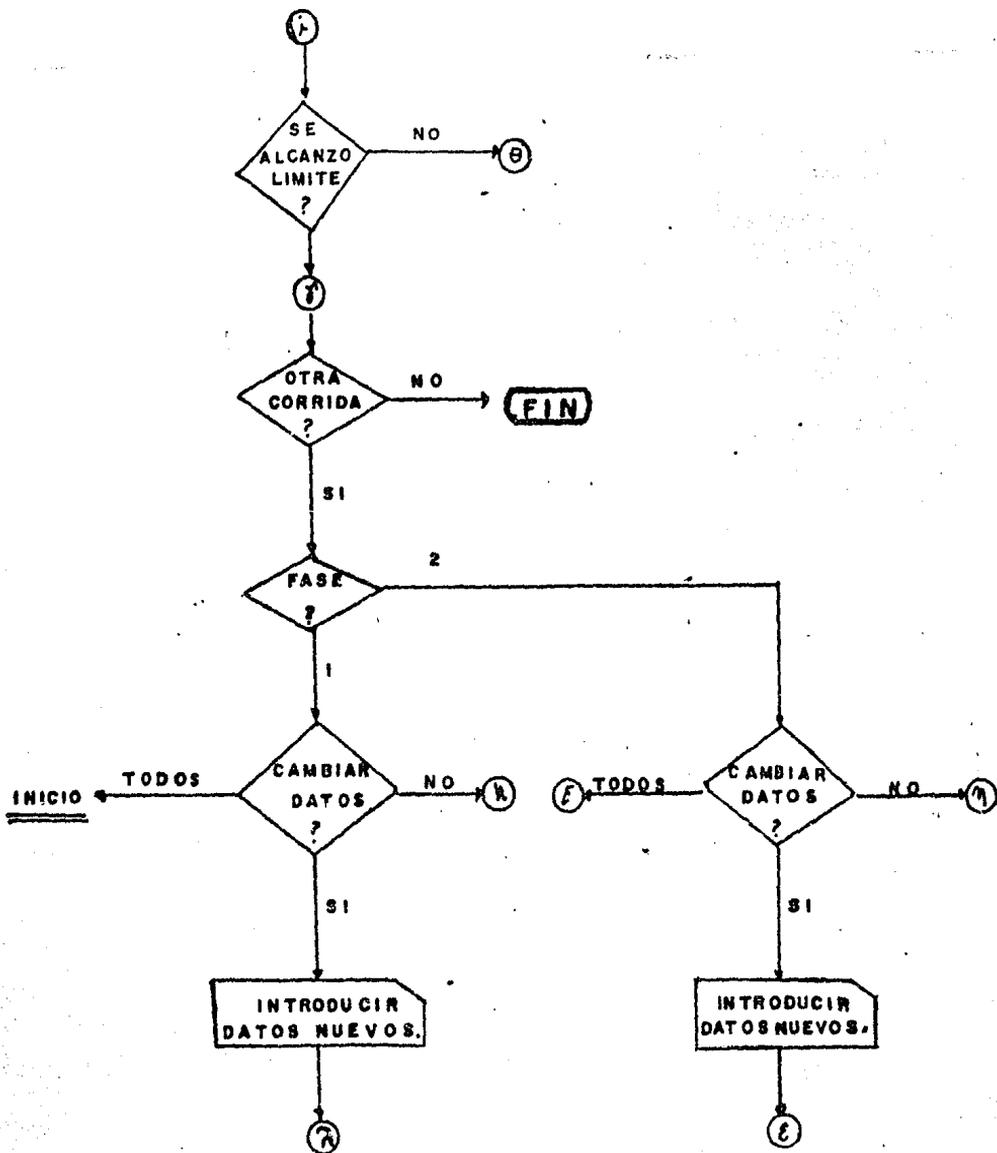
24.- Stokes, D. D., Brew, J. R., Whitten, D. G. y Wooden, L. W. : " Steam-drive as a supplementary recovery process in an intermediate-viscosity reservoir, Mount Poso field, California ". Journal of Petroleum Technology (Enr, 1978) 125 - 131.

PSEUDOCODIGO









CODIFICACION

```
10 DIM UDI (150), TS(20), PS(20), EI(20), IS(20)
80 INPUT " Nombre del campo      : "; NC$
85 INPUT " Ubicacion             : "; UB$
90 INPUT " Usuario del programa  : "; US$
95 IF FA = 0 THEN 100 ELSE 105
100 INPUT "Desea correr la parte 1, que determina el gasto optimo (tecleo 1) o
la parte 2. que determina el comportamiento del desplazamiento (tecleo 2)";FA
105 IF FA=1 THEN 125
110 IF FA = 2 THEN 180
115 PRINT " !! E R R O R !! "
120 GOTO 100
125 REM " ***** INTRODUCCION DE DATOS BASICOS ***** "
130 INPUT " Presion de inyeccion de vapor 1 [ lb/pg2 abs ] = "; P1
135 INPUT " Presion de inyeccion de vapor 2 [ lb/pg2 abs ] = "; P2
140 IF P1 < P2 AND P1 > 0 THEN 155
145 PRINT " !! E R R O R !! "
150 GOTO 130
155 INPUT " Gasto de inyeccion de vapor 1 [ bl/dia ] = "; I1S
160 INPUT " Gasto de inyeccion de vapor 2 [ bl/dia ] = "; I2S
165 IF I1S < I2S AND I1S > 0 THEN 176
170 PRINT " !! E R R O R !! "
175 GOTO 155
176 INPUT " Rel. de flujo de la prueba (lineal = 1, geom. = 2 ) = "; FLU
177 IF FLU = 1 THEN FL$ = "LINEAL"
178 IF FLU = 2 THEN FL$ = "GEOMETRICA"
180 INPUT " Espesor neto de la formacion [ pies ] = "; HN
185 INPUT " Calidad del vapor inyectado [ fracc. ] = "; HS
190 IF HS < 1 AND HS > 0 THEN 205
195 PRINT " !! E R R O R !! "
200 GOTO 185
```

```

205 INPUT " Permeabilidad relativa al vapor [ darcies ]      = "; KS
210 IF KS < 10 THEN 225
215 PRINT " !! E R R O R !! "
220 GOTO 205
225 INPUT " Densidad del aceite [ grados API ]              = "; API
230 IF API >= 10 THEN 240
235 PRINT " !! E R R O R !! "
236 GOTO 225
240 DED = 8829.599 / (API + 131.5)
241 IF FA = 2 THEN 732
245 INPUT " Desea utilizar un gasto de inyeccion determinado ( SI/NO ) "; Q$
250 IF Q$ = "SI" THEN 270
255 IF Q$ = "NO" THEN 275
260 PRINT " !! E R R O R !! "
265 GOTO 245
270 INPUT " Gasto de inyeccion determinado [ bl/dia ]       = "; IDET
275 INPUT " No. de variaciones del 10 %, mayores y menores = "; NIN
280 IF NIN <= 10 AND NIN >= 0 THEN 295
285 PRINT " !! E R R O R !! "
290 GOTO 275
295 IS = 100 : EFI = 0 : FAC = 1 : INC = 10 : SM = 0 : SU = 0 : SS = 0
300 EII = 0 : E2I = 0 : ZZ = 0 : BB = 0 : VARIO = 0 : H = 0
305 IF IDET <> 0 THEN IS = IDET
310 IF FLU = 1 THEN 315 ELSE 330
315 MM = (P2 - P1) / (I2S - I1S)
320 PS = P1 + MN * (IS - I1S)
325 GOTO 355
330 IF FLU = 2 THEN 345
335 PRINT " !! E R R O R !! "

```

```

345 MM = LOG (P2 / P1) / (I2S - I1S)
350 PS = P1 * EXP (MM * (IS - I1S))
355 IF IDET <> 0 THEN 545
356 SS = SS + 1
360 GOSUB 2500
365 IF SS = 1 THEN 370 ELSE 390
370 E1I = EFI
375 IS = IS + (FAC * INC)
380 IF FLU = 1 THEN 320
385 GOTO 350
390 E2I = EFI
395 IF E1I > E2I THEN 410
400 E1I = E2I ; IS = IS + (FAC * INC)
405 GOTO 310
410 FAC = -1 ; INC = .1 * INC ; E1I = E2I ; SM = SM + 1
415 IF SM > 1 THEN 425
420 GOTO 310
425 E1I = E1I ; ITER = SS ; TVAP = TS ; PVAP = PS
430 ISACT = IS
433 IF NIN = 0 THEN 526
435 FOR J = 1 TO NIN
440 IS (J) = ISACT - (.1 * J * ISACT) ; IS = IS (J)
445 IF FLU = 1 THEN 460
450 PS = P1 * EXP (MM * (IS - I1S))
455 GOTO 465
460 PS = P1 + MM * (IS - I1S)
465 GOSUB 2500
470 PS (J) = PS ; TS (J) = TS ; EI (J) = EFI
475 NEXT J
480 FOR J = (NIN + 1) TO (NIN * 2)

```

```

485 SU = SU + 1
490 IS (J) = ISACT + (.1 * SU * ISACT) : IS = IS (J)
495 IF FLU = 1 THEN 510
500 PS = P1 * EXP (MM * (IS - IIS))
505 GOTO 515
510 PS = P1 + MM * (IS - IIS)
515 GOSUB 2500
520 PS (J) = PS : TS (J) = TS : EI (J) = EFI
525 NEXT J
526 LPRINT : LPRINT : LPRINT
527 LPRINT " ++++++ F A S E I ++++++ "
528 LPRINT " ++++++ "
529 LPRINT : LPRINT : LPRINT
530 LPRINT " ----- D A T A S ----- "
531 LPRINT " ----- "
532 LPRINT
533 LPRINT " Prueba de inyeccion "
534 LPRINT " Presion = ";P1;" [ lb/pg2 abs ] ", " Gasto = ";IIS;" [ b1/dia ]"
535 LPRINT " Presion = ";P2;" [ lb/pg2 abs ] ", " Gasto = ";I2S;" [ b1/dia ]"
536 LPRINT : LPRINT " Relacion de flujo = "; FLQ
537 LPRINT " ----- "
538 LPRINT
539 LPRINT " Espesor neto de la formacion = "; HN , " [ pies ] "
540 LPRINT " Calidad del vapor inyectado = "; HS * 100 , " % "
541 LPRINT " Permeabilidad al vapor = "; KS , " [ darcies ] "
542 LPRINT " Densidad del aceite = "; API , " [ grados API ] "
543 LPRINT : LPRINT
544 GOTO 535
545 GOSUB 2500
550 EII = EFI : TVAP = TS : PVAP = PS

```

```

551 GOTO 430
555 LPRINT " ----- R E S U L T A D O S ----- "
556 LPRINT " ----- "
557 LPRINT
560 IF IDET = 0 THEN 575
565 LPRINT " Gasto determinado de inyeccion de vapor = "; IDET , " [ lb/dia ] "
570 GOTO 580
575 LPRINT " Gasto optimo calculado de inyeccion de vapor = "; ISACT, " [lb/dia]"
580 LPRINT " Eficiencia vertical maxima = "; EII
585 LPRINT " Presion de inyeccion del vapor = "; PVAP; " [ lb/pg2 abs ] "
590 LPRINT " Temperatura de inyeccion del vapor = "; TVAP; " [ grados F ] "
595 LPRINT ; LPRINT
596 IF NIN = 0 THEN 700
600 LPRINT " ----- RESULTADOS VARIANDO EL GASTO ----- "
605 LPRINT " *****"
606 LPRINT
610 FOR I = 1 TO NIN
615 VARIA = 10 * I
620 LPRINT " Diferencia de gasto = - "; VARIA ; " % "
625 LPRINT " Gasto de inyeccion = "; IS(I) , " [ lb/dia ] "
630 LPRINT " Presion de inyeccion = "; PS(I) , " [ lb/pg2 abs ] "
635 LPRINT " Temperatura de inyeccion = "; TS(I) , " [ grados F ] "
640 LPRINT " Eficiencia vertical = "; EI(I)
645 LPRINT ; NEXT I
650 LPRINT ; LPRINT
651 Z7 = NIN + 1 ; B8 = NIN * 2
655 FOR J = Z7 TO B8
660 H = H + 1
665 VARIO = 10 * H
670 LPRINT " Diferencia de gasto = + "; VARIO ; " % "

```

```

675 LPRINT " Gasto de inyeccion      = "; IS(J) , " [ lb/dia ] "
680 LPRINT " Presion de inyeccion    = "; PS(J) , " [ lb/pg2 abs] "
685 LPRINT " Temperatura de inyeccion = "; TS(J) , " [ grados F ] "
690 LPRINT " Eficiencia vertical      = "; EI(J)
695 LPRINT : NEXT J
700 LPRINT : LPRINT : LPRINT
705 INPUT " Desea el comportamiento de desplazamiento ( SI/NO ) "; CD$
710 IF CD$ = "NO" THEN 1195
715 IF CD$ = "SI" THEN 725
720 PRINT " !! E R R O R !! " ; GOTO 705
721 IF CORR = 2 THEN 1525
725 REM
726 REM " ***** INICIA PROCEDIMIENTO DE CALCULO ***** "
727 REM
730 IF FA = 1 THEN 740
731 INPUT " Nombre del campo          : "; NC$
    : INPUT " Ubicacion                : "; UB$
    : INPUT " Usuario del programa     : "; US$
732 INPUT " Gasto de inyeccion [ lb/dia ]      = "; ISACT
734 INPUT " Presion de inyeccion [ lb/pg2 abs ] = "; PVAP
735 INPUT " Temperatura de inyeccion [ grados F ] = "; TVAP
740 INPUT " Temperatura de formacion [ grados F ] = "; TFDR
745 INPUT " Porosidad de la formacion [ fracc. ] = "; F1
755 INPUT " Saturacion inicial de aceite [ fracc. ] = "; S10
760 INPUT " Saturacion residual de aceite [ fracc. ] = "; SR0
765 INPUT " Saturacion inicial de gas [ fracc. ] = "; SG1
770 IF F1 < 1 AND S10 < 1 AND SR0 < 1 AND SG1 < 1 THEN 790
775 PRINT " !! E R R O R !! "
780 PRINT " Alguno de los 4 datos anteriores no esta correcto, REVISE "
785 GOTO 745

```

```

770 INPUT " Conoce la conductividad termica de la roca ( SI/NO )"; CT#
795 IF CT# = "SI" THEN B25
800 IF CT# = "NO" THEN B15
805 PRINT " !! E R R O R !! "
810 GOTO 790
815 HCN = 1.04 - 1.3 * FI + .77 * SQR ( 1 - SIO )
820 GOTO B30
825 INPUT " Conductividad termica de la roca [ BTU/pie-hr-F ] = "; HCN
830 INPUT " Viscosidad inicial del aceite @ Temp. For. [ cp ] = "; VIO
835 INPUT " Capacidad termica de la zona de vapor [ BTU/pie3-F ] = "; MI
840 INPUT " Espesor bruto de la formacion [ pies ] = "; THT
845 INPUT " Area efectiva del patron de pozos [ acres ] = "; AEP
850 REM
851 REM " ***** PUNTO LIMITE DEL DESPLAZAMIENTO ***** "
852 REM
853 RA = 0 : NP = 0 : OA = 0 : OO = 0 : TIE = 0 : N = 0 : OSL = 0 : TLD = 0
855 INPUT " Desea una relacion instantanea aceite/vapor limite ( SI/NO )"; RI#
860 IF RI# = "SI" THEN B80
865 IF RI# = "NO" THEN B95
870 PRINT " !! E R R O R !! "
875 GOTO B55
880 INPUT " Relacion instantanea aceite/vapor limite = "; OSL
885 IF OSL < 1 AND OSL > 0 THEN B95
890 PRINT " !! E R R O R !! " ; GOTO B80
895 INPUT " Tiempo limite de desplazamiento [ a~os ] = "; TLD
897 INPUT " Intervalos de tiempo [ a~os ] = "; DTI
900 OIL = 7750.88 * AEP * HN * FI * SIO
905 HTLV = B65 - .207 * PVAP
910 FHD = (SIS * HTLV) / (TVAP - TFOR)
915 TCD = .48 * (FHD ^ 1.71)

```

```

720 TIE = TIE + DTI ; N = N + 1
725 TD = (42046! * HCN * TIE) / (THT * THT * M1)
930 C1 = 1 / (1 + .3275911 * SGR (TD))
935 C2 = .254829572# * C1 - .284496736# * C1 * C1
940 C3 = 1.421413741# * (C1 ^ 3) - 1.453152027# * (C1 ^ 4)
945 C4 = 1.061405429# * (C1 ^ 5)
950 ERFC = (C2 + C3 + C4) * EXP (-TD)
955 C5 = EXP (TD) * ERFC + 2 * SGR (TD / 3.141593) - 1
956 IF TD > TCD THEN 960 ELSE 975
960 C6 = SGR ((TD - TCD) / 3.141593)
965 C7 = ((TD - TCD - 3) / 3) * EXP (TD) * ERFC
970 CB = (TD - TCD) / (3 * SGR (3.141593 * TD))
972 GOTO 978
975 EHS = (1 / TD) * C5
976 GOTO 980
978 EHS = (1 / TD) * (C5 - C6 * (1 / (1 + FHD)) + C7 - CB)
980 VSI = ISACT * TIE * 365
985 FSD = (62.4 * HN * (SIO - SRO) * FI * (1 + FHD) * EHS) / (M1 * THT)
990 ODI (N) = FSD * VSI
995 HFF = 71 * (PVAF ^ .2574)
1000 HRT = 14.6 * ISACT * (HFF + HS * HTLV - (TFOR - 32))
1005 AS = (HRT * HN * C5) / (209088! * HCN * (TVAP - TFOR))
1010 QDU = (ODI (N) - ODI (N - 1)) / (DTI * 365)
1015 IF SGI <> 0 THEN 1030
1020 VPD = 1!
1025 GOTO 1035
1030 VPD = ((5.62 * VSI) / (43560! * AEP * HN * FI * SGI)) ^ 2
1032 IF VPD > 1! THEN VPD = 1!
1035 IF VIO > 100 THEN 1050
1040 ACO = 1!

```



```

1122 LPRINT " ----- D A T O S ----- "
1124 LPRINT " ----- "
1126 LPRINT
1127 LPRINT " Nombre del campo          = "; NC$
1128 LPRINT " Gasto de inyeccion de vapor      = "; ISACT ; " [ bl/dia ] "
      : LPRINT " Presion de inyeccion de vapor  = "; PVAP ; " [ lb/pg2 abs ] "
      : LPRINT " Temperatura de inyeccion de vapor = "; TVAP ; " [ grados F ] "
1129 LPRINT " Saturacion inicial de aceite     = "; SIO * 100 ; " % "
1130 LPRINT " Saturacion residual de aceite    = "; SRO * 100 ; " % "
1131 LPRINT " Saturacion inicial de gas        = "; SGI * 100 ; " % "
1132 LPRINT " Conductividad termica de la roca = "; HCN " [ BTU/pie-hr-F ] "
1133 LPRINT " Viscosidad inicial del aceite    = "; VIO " [ cp ] "
1134 LPRINT " Cap. termica de la zona de vapor  = "; M1 ; " [ BTU/pie3-F ] "
1135 LPRINT " Densidad del aceite              = "; API ; " [ grados API ] "
1136 LPRINT " Area efectiva del patron de pozos = "; AEP ; " [ acres ] "
1137 LPRINT " Espesor neto de la formacion     = "; HN ; " [ pies ] "
1138 LPRINT " Permeabilidad relativa al vapor  = "; KS ; " [ darcies ] "
1139 LPRINT " Calidad del vapor inyectado      = "; HS*100 ; " % "
1140 LPRINT : LPRINT : LPRINT
1141 LPRINT " ----- R E S U L T A D O S ----- "
1142 LPRINT " ----- "
      : LPRINT : LPRINT " Aceite original in-situ = "; OIL ; " [ bls ] "
1143 LPRINT
1144 LPRINT " Tiempo de inyeccion              = "; TIE ; " [ a*os ] "
1145 LPRINT " Rel. acum. aceite prod./vapor iny.= "; FOS
1147 LPRINT " Tama*o de la zona de vapor       = "; AS ; " [ acres ] "
1149 LPRINT " Eficiencia termica promedio      = "; EHS
1151 LPRINT " Aceite producido                 = "; NP ; " [ bls ] "
1153 LPRINT " Gasto de aceite prom. del periodo = "; QO ; " [ bls/dia ] "
1155 LPRINT " Rel. inst. aceite prod./vapor iny.= "; RISO
1160 GOTO 920
1165 LPRINT : LPRINT " SE ALCANZO EL TOTAL DEL ACEITE IN-SITU DESPLAZABLE "

```

```
1170 GOTO 1190
1175 LPRINT : LPRINT "           SE ALCANZO EL TIEMPO LIMITE           "
1180 GOTO 1190
1185 LPRINT : LPRINT " SE ALCANZO LA RELACION ACEITE / VAPOR LIMITE "
1190 LPRINT : LPRINT : LPRINT
1195 INPUT " Desea correr nuevamente el programa ( SI/NO ) "; DC#
1200 IF DC# = "NO" THEN 2590
1205 IF DC# = "SI" THEN 1210
1210 PRINT " !! E R R O R !! "
1215 GOTO 1195
1218 CORR = 2
1220 INPUT " Que parte desea correr ( 1 o 2 ) "; FA
1225 IF FA = 1 THEN 1245
1230 IF FA = 2 THEN 1525
1235 PRINT " !! E R R O R !! "
1240 GOTO 1120
1245 INPUT " Desea cambiar algun dato ( SI/NO ) "; DC#
1250 IF DC# = "SI" THEN 1270
1255 IF DC# = "NO" THEN 305
1260 PRINT " !! E R R O R !! "
1265 GOTO 1245
1270 PRINT " Las opciones son : "
1275 PRINT " 1) Datos de la prueba de inyectividad. "
1280 PRINT " 2) Espesor neto de la formacion. "
1285 PRINT " 3) Calidad del vapor inyectado. "
1290 PRINT " 4) Permeabilidad relativa al vapor. "
1295 PRINT " 5) Densidad del aceite. "
1300 PRINT " 6) Gasto determinado de vapor. "
1305 PRINT " 7) Todos los datos. "
1310 PRINT
```

```
1310 INPUT " Cual opcion elige "; OP
1320 IF OP = 1 THEN 1365
1325 IF OP = 2 THEN 1435
1330 IF OP = 3 THEN 1445
1335 IF OP = 4 THEN 1465
1340 IF OP = 5 THEN 1475
1345 IF OP = 6 THEN 1490
1350 IF OP = 7 THEN 80
1355 PRINT " !! E R R O R !! "
1360 GOTO 1310
1365 INPUT " Presion de inyeccion de vapor 1, [ lb/pg2 abs ] = "; P1
1370 INPUT " Presion de inyeccion de vapor 2, [ lb/pg2 abs ] = "; P2
1375 IF P1 > 0 AND P1 < P2 THEN 1390
1380 PRINT " !! E R R O R !! "
1385 GOTO 1365
1390 INPUT " Gasto de inyeccion de vapor 1, [ bl/dia ] = "; I15
1395 INPUT " Gasto de inyeccion de vapor 2, [ bl/dia ] = "; I25
1400 IF I15 >= 0 AND I15 < I25 THEN 1415
1405 PRINT " !! E R R O R !! "
1410 GOTO 1390
1415 INPUT " Relacion lineal (1) o geometrica (2) = "; FLU
1420 IF FLU = 1 OR FLU = 2 THEN 1495
1425 PRINT " !! E R R O R !! "
1430 GOTO 1415
1435 INPUT " Espesor neto de la formacion [ pies ] = "; HN
1440 GOTO 1495
1445 INPUT " Calidad del vapor inyectado [ fracc. ] = "; HS
1450 IF HS > 0 AND HS < 1 THEN 1495
1455 PRINT " !! E R R O R !! "
1460 GOTO 1445
```

```

1455 INPUT " Permeabilidad relativa al vapor [ darcies ] = "; K5
1470 GOTO 1495
1475 INPUT " Densidad del aceite [ grados API ] = "; API
1480 DED = 8829.699 / (API * 131.5)
1485 GOTO 1495
1490 INPUT " Gasto determinado de inyeccion [ bls/dia ] = "; IDET
1495 PRINT
1500 INPUT " Desea cambiar otro dato "; COD$
1505 IF COD$ = "SI" THEN 1310
1510 IF COD$ = "NO" THEN 295
1515 PRINT " !! E R R O R !! "
1520 GOTO 1500
1525 INPUT " Desea cambiar algun dato ( SI/NO ) "; CA$
1530 IF CA$ = "SI" THEN 1550
1535 IF CA$ = "NO" THEN 850
1540 PRINT " !! E R R O R !! "
1545 GOTO 1525
1550 PRINT : PRINT " Las opciones son : "
1555 PRINT " 1) Gasto de inyeccion de vapor. "
1560 PRINT " 2) Presion de inyeccion de vapor. "
1565 PRINT " 3) Temperatura de inyeccion de vapor. "
1570 PRINT " 4) Temperatura de la formacion. "
1575 PRINT " 5) Porosidad de la formacion. "
1580 PRINT " 6) Saturacion inicial de aceite. "
1585 PRINT " 7) Saturacion residual de aceite. "
1590 PRINT " 8) Saturacion inicial de gas. "
1595 PRINT " 9) Conductividad termica de la roca. "
1600 PRINT " 10) Viscosidad inicial del aceite. "
1605 PRINT " 11) Capacidad termica de la zona de vapor. "
1610 PRINT " 12) Espesor bruto de la formacion. "

```

```
1615 PRINT " 13) Area efectiva del patron. "
1616 PRINT " 14) Espesor neto de la formacion. "
1617 PRINT " 15) Calidad del vapor inyectado. "
1618 PRINT " 16) Permeabilidad relativa al vapor "
1619 PRINT " 17) Densidad del aceite. "
1620 PRINT " 18) Todos los datos. "
1625 PRINT
1630 INPUT " Cual opcion elige "; OE
1635 IF OE = 1 THEN 1715
1640 IF OE = 2 THEN 1725
1645 IF OE = 3 THEN 1735
1650 IF OE = 4 THEN 1745
1655 IF OE = 5 THEN 1765
1660 IF OE = 6 THEN 1785
1665 IF OE = 7 THEN 1805
1670 IF OE = 8 THEN 1825
1675 IF OE = 9 THEN 1845
1680 IF OE = 10 THEN 1855
1685 IF OE = 11 THEN 1865
1690 IF OE = 12 THEN 1875
1695 IF OE = 13 THEN 1885
1696 IF OE = 14 THEN 1886
1697 IF OE = 15 THEN 1887
1698 IF OE = 16 THEN 1888
1699 IF OE = 17 THEN 1889
1700 IF OE = 18 THEN 80
1705 PRINT " !! E R R O R !! "
1710 GOTO 1630
1715 INPUT " Gasto de inyeccion de vapor [ bl/dia ] " ISACT
1720 GOTO 1690
```

```

1725 INPUT " Presion de inyeccion de vapor [ lb/pg2 abs ] = "; PVAP
1730 GOTO 1890
1735 INPUT " Temperatura de inyeccion de vapor [ grados F ] = "; TVAP
1740 GOTO 1890
1745 INPUT " Temperatura de la formacion [ grados F ] = "; TFOR
1750 IF TVAP > 212 AND TVAP > TFOR THEN 1890
1755 PRINT " !! E R R O R !! "
1760 GOTO 1735
1765 INPUT " Porosidad de la formacion [ fracc. ] = "; FI
1770 IF FI < 1 AND FI > 0 THEN 1890
1775 PRINT " !! E R R O R !! "
1780 GOTO 1765
1785 INPUT " Saturacion inicial de aceite [ fracc. ] = "; SIO
1790 IF SIO < 1 AND SIO > 0 THEN 1890
1795 PRINT " !! E R R O R !! "
1800 GOTO 1785
1805 INPUT " Saturacion residual de aceite [ fracc. ] = "; SRD
1810 IF SRD > 0 AND SRD < 1 THEN 1890
1815 PRINT " !! E R R O R !! "
1820 GOTO 1805
1825 INPUT " Saturacion inicial de gas [ fracc. ] = "; SGI
1830 IF SGI > 0 AND SGI < 1 THEN 1890
1835 PRINT " !! E R R O R !! "
1840 GOTO 1825
1845 INPUT " Conductividad termica de la roca [ BTU/pie-hr-F ] = "; HCN
1850 GOTO 1890
1855 INPUT " Viscosidad inicial del aceite @ temp. form. [ cp ] = "; VIO
1860 GOTO 1890
1865 INPUT " Capacidad termica de la zona de vapor [ BTU/pie3-F ] = "; MI
1870 GOTO 1890
1875 INPUT " Espesor bruto de la formacion [ pies ] = "; THI

```

```

1880 GOTO 1890
1885 INPUT " Area efectiva del patron [ acres ]" = "; AEP
1886 INPUT " Espesor neto de la formacion [ pies ] = "; HN
      : GOTO 1890
1887 INPUT " Calidad del vapor inyectado [ fracc. ] = "; HS
      : GOTO 1890
1888 INPUT " Permeabilidad relativa al vapor [ fracc. ] = "; KS
      : GOTO 1890
1889 INPUT " Densidad del aceite [ grados API ] = "; API
      : DEO = 8829.597 / (API + 131.5)
1890 PRINT : INPUT " Desea cambiar otro dato "; DD*
1895 IF DD* = "SI" THEN 1630
1900 IF DD* = "NO" THEN 050
1905 PRINT " !! E R R O R !! "
1910 GOTO 1890
2500 REM
2501 REM " ***** SUBROUTINA DE EFICIENCIA ***** "
2502 REM
2505 IS = 115.1 * (PS ^ .225)
2510 MUS = .0000517 * TS + .00049
2515 DST = 3.06 * EXP (.000359 * PS) - 5
2520 AA1 = 5900 * MUS * IS * HS
2525 AA2 = 3.141593 * (DEO - DST) * (HN * HN) * KS * DST
2530 EFI = SQR (AA1 / AA2)
2535 RETURN
2590 LPRINT : LPRINT : LPRINT
2591 LPRINT TAB (5) " REALIZO : "; US*
2592 LPRINT " ~~~~~ "
2595 REM
2596 REM " ***** FIN DEL PROGRAMA ***** "
2600 END

```