



8
29

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MODELO MATEMÁTICO PARA CALCULAR EL
COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE
INYECCIÓN DE VAPOR EN PROCESOS
DE RECUPERACIÓN TÉRMICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A
JESUS GARCIA MUÑOZ

DIRECTOR DE TESIS ING. MARIO BECERRA ZEPEDA

ASESOR: ING. SANTOS REYES GONZALEZ



MEXICO, D.F.

JUNIO DE 1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

CONTENIDO

INTRODUCCION	1
I. PROCESOS DE RECUPERACION TERMICA	3
I.1. INYECCION CICLICA DE VAPOR	4
I.2. DESPLAZAMIENTO CON VAPOR	5
I.3. INYECCION DE AGUA CALIENTE	7
I.4. COMBUSTION IN SITU	7
II. PROPIEDADES FISICAS DE LOS MATERIALES	9
II.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	10
II.2. PROPIEDADES FISICAS	14
II.2.1 AGUA	14
II.2.2 VAPOR	15
II.2.3 ACEITE	16
II.2.4 GASES HIDROCARBUROS	17
II.2.5 AIRE	18
II.2.6 FORMACION	18
II.2.7 ACERO	19
II.2.8 AISLANTE TERMICO	20
III. DESCRIPCION DEL SISTEMA DE INYECCION	21
III.1. SUPERFICIAL	22
III.1.1 GENERADOR DE VAPOR	22
III.1.2 LINEAS SUPERFICIALES	23
III.2. SUBSUPERFICIAL	24
III.2.1 TUBERIA DE REVESTIMIENTO	24

III.2.2	TUBERIA DE INYECCION-PRODUCCION	25
III.2.3	AISLANTE TERMICO	26
III.2.4	CEMENTACION	26
III.3.	YACIMIENTO	27
III.3.1	TIPO DE TERMINACION	27
III.3.2	ESPESOR DEL INTERVALO PRODUCTOR	27
IV.	PERDIDAS DE CALOR EN EL SISTEMA DE INYECCION	31
IV.1.	PERDIDAS DE CALOR EN LINEAS SUPERFICIALES	33
IV.1.1	COEFICIENTE TOTAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR	34
IV.1.2	PERDIDA TOTAL DE CALOR EN TUBERIAS AEREAS	36
IV.1.3	PERDIDA TOTAL DE CALOR EN TUBERIAS ENTERRADAS	37
IV.2.	PERDIDAS DE CALOR EN EL APAREJO DE INYECCION	38
IV.2.1	COEFICIENTE TOTAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR	38
IV.2.2	VARIACION DE LA PRESION Y LA CALIDAD DEL VAPOR CON LA PROFUNDIDAD	44
IV.2.3	PERDIDA TOTAL DE CALOR	49
IV.3.	PERDIDAS DE CALOR HACIA LAS FORMACIONES ADYACENTES	49
IV.4	PROGRAMA DE COMPUTO	55
V.	EJEMPLO DE APLICACION	73
VI.	CONCLUSIONES	87
APENDICE A	90
APENDICE B	105
NOMENCLATURA	113
REFERENCIAS	119

RESUMEN

Este trabajo, para cumplir con el objetivo de aportar un modelo matemático que simule el comportamiento de un sistema de inyección de vapor, intenta, además señalar los aspectos fundamentales de los procesos de recuperación térmica; puntualizando las propiedades físicas de los materiales, inherentes a los fenómenos térmicos en los procesos de inyección de fluidos calientes; por otro lado, se describen las partes esenciales que integran al sistema de inyección que incluyen instalaciones, pozo y formación productora.

En relación con el programa de cómputo, se analizó la teoría de los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en el sistema de paredes compuestas con geometría radial integrado por las líneas superficiales, por el pozo y por el yacimiento.

Se plantea también un ejemplo con dos alternativas prácticas para la ilustración y validación de los algoritmos utilizados.

Finalmente se incluyen los apéndices correspondientes, que contribuyen con gráficas, tablas y expresiones matemáticas al respaldo de los conceptos y métodos utilizados.

INTRODUCCION

La industria petrolera hace frente al reto de, por lo menos, mantener las reservas de hidrocarburos, ya sea descubriendo nuevos campos petroleros o explotando al máximo los ya descubiertos, mediante procesos adicionales de recuperación. Estos procesos se implantan para mejorar las condiciones de flujo del aceite en el medio poroso, una vez que el yacimiento haya disminuido sustancialmente su capacidad original para fluir.

Básicamente los métodos más aplicados son los de recuperación secundaria: la inyección de agua y la inyección de gas natural.

Después de aplicar recuperación secundaria a un yacimiento, pueden aplicarse otras técnicas de explotación más complejas, como los procesos térmicos, miscibles, y químicos, los cuales se conocen como procesos de recuperación mejorada.

Los procesos de recuperación térmica han venido creciendo en importancia en la industria petrolera mundial a partir de que grandes cantidades de aceite previamente consideradas como irrecuperables o económicamente inexplotables se han producido por este tipo de mecanismos de recuperación, principalmente por inyección de vapor.

En México, la recuperación térmica se ha aplicado únicamente en forma experimental, con gran éxito técnico en pruebas piloto de inyección cíclica de vapor en los campos Cacalilao y Moloacán^{(1,2)*}.

* Referencias al final

En los procesos de inyección de vapor, tanto las tuberías del pozo, como las líneas superficiales de conducción, estarán sometidas a altos esfuerzos térmicos, los cuales pudieran provocar fallas mecánicas durante la inyección. Otra variable muy importante en estos procesos de recuperación, es la calidad del vapor que se entrega al yacimiento, para lo cual es necesario determinar la cantidad de calor que pierde el vapor en su recorrido hacia el intervalo productor.

Con el objeto de conocer la variación de esos parámetros, este trabajo presenta un programa de cómputo que simula el comportamiento térmico del sistema integral de inyección.

CAPITULO I
PROCESOS DE RECUPERACION TERMICA

Los procesos de recuperación térmica básicos son: la inyección cíclica de vapor, también llamada estimulación con vapor, el desplazamiento con vapor, la inyección de agua caliente y la combustión "in situ". Por lo general estos procesos son aplicados en yacimientos de aceite de alta viscosidad, parámetro que es determinante para la movilidad del aceite en el espacio poroso del yacimiento.

El aceite remanente en este tipo de yacimientos contiene grandes cantidades de fracciones no destilables (a temperatura del yacimiento); así como asfaltenos que obstruyen la porosidad del medio.

La aplicación de un proceso térmico de recuperación le permite al aceite reducir su viscosidad, destilar algunas de sus fracciones y provocarle una expansión térmica, con lo cual ocurrirán cambios en las fuerzas de tensión superficial, mejorando sustancialmente su movilidad en el medio poroso.

I.1 INYECCION CICLICA DE VAPOR

Este proceso se desarrolla en un sólo pozo y su principal efecto es estimular la formación. La inyección cíclica consiste en inyectar una masa de vapor de alta calidad (80% por lo menos) al yacimiento a gastos del orden de 1000 barriles por día, por un período de dos a tres semanas; después de un período de cierre del pozo (que puede ser de unos cuantos días hasta varias semanas, dependiendo de las características de geometría, tamaño y potencial de la formación productora), para permitir que el vapor ceda su calor latente al sistema roca fluidos, se abre el

pozo a producción (cuya etapa requiere generalmente la aplicación de un sistema de bombeo artificial). El proceso se efectúa repetitivamente en forma de ciclos, hasta obtener recuperaciones de aceite a un límite económico. La respuesta de la producción para el primer ciclo de inyección es de 8 a 10 veces más alta que para la producción no estimulada y la duración del ciclo es también más largo. El segundo y tercer ciclos tienen menor duración y menor efecto en el gasto de producción. La razón de la mejor respuesta en los primeros ciclos se explica por los efectos principalmente de reducción de la viscosidad del crudo, limpieza de la vecindad del pozo (remoción de depósitos parafínicos y asfálticos) y por supuesto por la saturación de aceite.

La inyección cíclica de vapor se aplica por lo general en yacimientos con viscosidades entre los 100 y 50000 cp (a temperatura del yacimiento), a profundidades de hasta 3000 pies. El espesor del estrato productor debe ser mayor a 50 pies, para aprovechar eficientemente el calor del vapor de inyección.

Un buen indicador del funcionamiento del proyecto es la relación del aceite producido al agua inyectada. Los mejores resultados indican que en los primeros ciclos se recobran tanto como 30 Bls. de aceite por barril de agua inyectada⁽²³⁾.

El porcentaje promedio de la recuperación exclusivamente por este método puede llegar a ser hasta de 15% del volumen original de aceite.

1.2 DESPLAZAMIENTO CON VAPOR

La inyección continua de vapor, debido a que barre mayores áreas, permite gastos más altos de inyección que la estimulación con vapor, lo cual se manifiesta en una mejor eficiencia térmica.

Los gastos de inyección de vapor pueden alcanzar los 1300 bl/día y hasta períodos ininterrumpidos de meses.

Usualmente un proceso de desplazamiento con vapor se aplica previo agotamiento por estimulación a través de la inyección cíclica, lo cual agiliza la producción inicial del yacimiento y permite una inyección continua más efectiva por el calentamiento integral de las áreas estimuladas.

El factor de recuperación como resultado de un proceso térmico está definido por las características particulares de cada yacimiento. Por ejemplo, la recuperación final de aceite por explotación primaria o convencional para un cierto yacimiento con características muy pobres, puede estar en un rango de 5-10 % del volumen original de aceite, N . Un proceso térmico podría incrementar este factor hasta un 30-35 %. Sin embargo para las mejores características de yacimiento, la recuperación convencional estaría entre 55 y 60 % de N , donde la recuperación térmica sólo adicionaría un 5% de $N^{(2)}$.

Para asegurar un barrido uniforme, los pozos de inyección están distribuidos entre los pozos productores. Esto se hace convirtiendo los pozos productores ya existentes en pozos inyectoros o perforando nuevos pozos de inyección. La distancia entre pozos depende de las características del yacimiento o de las necesidades de explotación. En muchos campos esta distancia es del orden de los 2500 pies.

El patrón de flujo más común en los procesos de recuperación térmica (excepto para la inyección cíclica que utiliza un sólo pozo) es el arreglo de cinco pozos, en los E.U.: cada pozo de inyección está localizado en el centro de un cuadrado definido por cuatro pozos productores.

I.3 INYECCION DE AGUA CALIENTE

Este proceso es básicamente un desplazamiento inmisible del aceite por agua caliente. Es un método menos efectivo que la inyección continua de vapor, debido al bajo contenido de calor del agua caliente. Se desarrollan los mismos efectos que para el desplazamiento con vapor, pero, en menor escala. Sin embargo, la inyección de agua caliente mejora las fuerzas de empuje, propiciando un mejor barrido del medio poroso.

Por ejemplo, si se inyecta agua caliente a 350 °F en un yacimiento a 130 °F, el calor adicionado a la formación es de 224 Btu/lb_m. Por otro lado, si se inyectara vapor a 350 °F en ese mismo yacimiento, el contenido de calor adicionado sería de 1194 Btu/lb_m.

La inyección de agua caliente se aplica en yacimientos someros, de hasta 2500 pies, con aceites de viscosidad en un rango de 100 a 1000 cp.

I.4 COMBUSTION IN SITU

La combustión in situ es la ignición del propio aceite que satura los poros de la roca del yacimiento. Esto se hace con el propósito de generar calor, y al mismo tiempo un mecanismo de desplazamiento. Este proceso, requiere de inyectar aire a altas presiones en el yacimiento para que ocurra una reacción de ignición espontánea del aceite con el oxígeno del aire, en algunas ocasiones se instala un quemador artificial cuando no ocurre esta reacción, la cual depende de las condiciones de presión, temperatura y saturación de gas en la formación.

CAPITULO II
PROPIEDADES FISICAS DE LOS MATERIALES

Con el propósito de predecir apropiadamente el comportamiento del sistema de inyección de vapor es indispensable conocer las propiedades físicas, asociadas con los fenómenos térmicos de los elementos que intervienen en el proceso de recuperación.

II.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Calor específico, C

Es la habilidad de una sustancia de absorber calor, se expresa como la cantidad de energía (Caloría o Btu) necesaria para incrementar 1 °F una lb_m de esa sustancia.

Para cualquier sustancia entre más alto sea su calor específico más grande es la cantidad de calor que puede absorber para un incremento de temperatura dado.

Temperatura de saturación, T_s

La temperatura de saturación o punto de ebullición se alcanza cuando la presión de vapor de un líquido al que se le está adicionando calor se iguala a la presión externa a la que se encuentra sometido, en ese punto, el líquido se satura con calor y empieza a hervir.

Calor de vaporización, L

El calor latente de vaporización es la cantidad de calor requerido para desprender las moléculas de la superficie de un líquido en la formación de vapor.

Entalpía, H

La entalpía es la energía calorífica de un sistema termodinámico, cuya magnitud depende de los estados inicial y final del mismo.

Cuando el agua a 32 °F se calienta a la temperatura de saturación a una presión particular, absorbe una cantidad de calor, H_f . A este calor se le llama entalpía del líquido saturado.

En tanto que la entalpía de vapor húmedo, H_g es el calor total, expresado como la suma de la entalpía del agua y el calor de vaporización.

Viscosidad, μ

La viscosidad se define como la fricción interna entre las moléculas de un fluido.

Es una constante de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y la velocidad del fluido,

$$f = \mu \, dv/dz.$$

Densidad, ρ

Es la relación entre la masa de un sólido o líquido y la masa de agua a la temperatura de 4°C que ocupa el mismo volumen.

Para un gas o vapor la relación es entre la masa del aire que, en idénticas condiciones de presión y temperatura, ocupa el mismo volumen.

Por convención, la densidad del agua es 1 y la del aire 1 también. Entonces, la densidad de cualquier sustancia es la relación entre su masa y su volumen que ocupa.

Conductividad térmica, K

Es una propiedad de los cuerpos de transmitir el calor. No todos los cuerpos transmiten igualmente el calor, algunos lo propagan con mucha facilidad como el acero. En la Ley de Fourier⁽¹⁴⁾, $q = -K \Delta T$, la conductividad térmica es el coeficiente de conducción de calor.

Compresibilidad, c

Es una propiedad de la materia a la cual se debe que casi todos los cuerpos disminuyan de volumen cuando se les comprime o somete a una presión.

Factor de volumen, B

El factor de volumen del gas se define como el volumen de una masa de gas medida a ciertas condiciones de presión y temperatura entre el volumen de dicha masa a condiciones standard.

El factor del volumen del aceite es la relación del volumen del aceite más su gas disuelto a condiciones de yacimiento y el volumen del aceite muerto (aceite sin gas disuelto) a condiciones standard.

Emisividad térmica, ϵ

Es la razón de la radiación emitida por cierta superficie a la radiación que emite un cuerpo negro conductor a la misma temperatura.

Difusividad térmica, α

Es la propagación del calor en la superficie de la roca del yacimiento durante un tiempo t. La difusividad relaciona la conductividad térmica y la capacidad calorífica de la roca del yacimiento,

$$\alpha = K/M.$$

Calidad del vapor, X

El porcentaje de calidad del vapor se expresa por el peso del vapor seco y saturado por libra de vapor húmedo.

II.2 PROPIEDADES FISICAS

II.2.1 AGUA

El agua es uno de los elementos de mayor importancia en los procesos de recuperación de aceite, posee las mejores propiedades térmicas, lo cual la hace responsable de que tanto en su fase líquida como en la gaseosa sea un ideal agente de transporte de calor.

1. Temperatura de saturación, $T_s = 212 \text{ }^\circ\text{F @ C.S.}$, Ec. A.1

2. Calor específico, $C_s = 1 \text{ Btu/lb}_m\text{-}^\circ\text{F @ C.S.}$

La fig. A.2 muestra el comportamiento del calor específico del agua. La viscosidad del agua puede calcularse con la Ec. A.2, el efecto de la presión sobre la viscosidad del agua es despreciable. La viscosidad del agua @ C.S. es de alrededor de 1 cp.

4. Densidad, $\rho = 1 \text{ gr/cc @ C.S.}$

5. El calor latente de vaporización del agua se puede obtener de tablas de vapor, o también de las Ecs. A.3 y A.4

6. La entalpía de tablas o de la Ec. A.5

7. La conductividad térmica de la mayoría de los líquidos, especialmente los líquidos orgánicos están en un rango de .05 a .2 Btu/hr-pie-°F. El agua es una excepción con valor máximo de .398 a alrededor de 130°C.

II.2.2 VAPOR

1. Calidad del vapor se puede obtener de la Ec. A.6

La medida de la calidad del vapor sólo puede servir como una referencia, puesto que en general, ésta varía considerablemente con las condiciones de operación. Un método para conocer la calidad del vapor consiste en medir las cantidades máscas de la fase líquida y del vapor seco en recipientes aislados bajo presión en un período corto de tiempo. La calidad del vapor está dada por la relación del flujo máscico del vapor seco al flujo máscico de las dos fases (vapor seco y líquido).

Las propiedades del vapor están tabuladas en un amplio rango de temperaturas y presiones.

La Fig. A.1 representa la variación del calor sensible (H_f), del calor latente de vaporización (H_g) y del calor total. Como se puede ver, empezando aproximadamente con una presión de 470 lb/Pg², el calor total del vapor empieza a decrecer con un incremento en la presión. El decremento en el contenido de calor latente del vapor llega a ser más grande que el incremento del calor sensible. Aplicadas estas propiedades al yacimiento, la presión de inyección del vapor deberá ser sólo la suficiente para desplazar los fluidos, por el hecho de que tendrá más contenido de calor que a presiones mayores.

2. El volumen específico del vapor seco, V_s , es el volumen ocupado por una libra de vapor seco y saturado, el cual se obtiene experimentalmente, ya que el vapor no se comporta como un gas ideal.

El volumen específico del vapor húmedo, V es la suma de los volúmenes de vapor seco y de líquido suspendido (Ecs. A.7 y A.8).

3. El factor de volumen del vapor puede estimarse con la ecuación A.9 o de los volúmenes específicos dados en tablas.

4. La compresibilidad del vapor de la Ec. A.10

5. La viscosidad del vapor a presión y temperatura de saturación está dada por la Ec. A.11

6. La densidad del vapor con la Ec. A.12

7. El calor específico del vapor saturado a las condiciones de presión y temperatura de la mayoría de los proyectos de inyección de vapor es de alrededor de .5 Btu/lb-°F.

8. La entalpía del vapor saturado se obtiene de tablas o de las Ecs. A.13 y A.14

9. La conductividad térmica del vapor se incrementa con la temperatura y presión. A altas temperaturas su valor se puede calcular de (A.15).

II.2.3 ACEITE

Una de las variables más importantes en la recuperación térmica de hidrocarburos es la viscosidad del aceite como una función de la temperatura.

1. La reducción de la viscosidad para un mismo incremento de temperatura es más evidente para aceites pesados. Por ejemplo, para un aceite de 10 °API, su viscosidad decrecerá de 100000 cp

a aproximadamente 10 cp, o sea 10000 veces. El mismo incremento de temperatura reduce la viscosidad de un crudo de 14 °API de 2000 cp a 4 cp, sólo 500 veces.

Se sugiere que la viscosidad del aceite sea medida en vez de calcularla con correlaciones.

2. La Tabla A.5 relaciona la densidad del aceite en grados API con la gravedad específica.

3. La tensión superficial en el aceite se reduce con la temperatura Fig. A.3. Esto implica que las fuerzas de presión capilar también se reducen a altas temperaturas.

4. El calor latente del aceite es mucho más bajo que el del agua.

5. Para el aceite la conductividad térmica se puede estimar de la Ec. A.16

Smith⁽²⁾ recomienda para todas las fracciones de aceite una constante $K = .0791 \text{ Btu/hr-pie-}^\circ\text{F}$ a una temperatura de 30 °C.

II.2.4 GASES HIDROCARBUROS

1. La viscosidad de un gas a baja presión se incrementa al elevarse la temperatura, mientras que para los líquidos ocurre lo contrario.

2. La conductividad térmica de los gases bajo temperatura y presión ordinarias está en un rango de .002 a .025 Btu/hr-pie-² con un promedio de .008. La conductividad del gas generalmente se incrementa con la temperatura. Y se puede estimar de la Ec. A.17

3. El factor de volumen del gas se calcula con la Ec. A.9

II.2.5 AIRE

1. La conductividad térmica y el calor específico del aire se muestra en la Fig. A.2. y A.4
2. La viscosidad del aire se incrementa con la temperatura. La Fig. A.4 muestra esta propiedad para 1 Atm. de presión.

II.2.6 FORMACION

Las propiedades térmicas de la matriz de la roca deberán considerarse en el diseño de un proyecto de inyección de vapor. Generalmente tales características son evaluadas suponiendo condiciones de saturación de agua, aceite y gas en el yacimiento. Por lo tanto el factor fundamental para estimar la transferencia de calor es la capacidad calorífica de la formación.

1. La capacidad calorífica M , es el producto de la densidad relativa y el calor específico de la roca. Tomando en consideración la presencia de las tres fases, M se estima de la Ec. A.18. Las capacidades térmicas de las rocas decrecen con la temperatura en aproximadamente 30%, para un amplio rango de temperatura.
2. La difusividad térmica se puede calcular mediante $\alpha = K/M$, la cual proporciona valores más adecuados que los medidos directamente. La difusividad térmica de las rocas decrece con el incremento en la temperatura.
3. La conductividad térmica de las rocas cristalinas decrece con el incremento en la temperatura. Un incremento en los esfuerzos a los que una roca está sometida incrementará sustancialmente su conductividad térmica. Para areniscas consolidadas, la conductividad térmica se puede

calcular de la Ec. A.19. Arenas no consolidadas y saturadas con agua son más conductivas que las no saturadas.

II.2.7 ACERO

1. Para aceros simples de carbono los esfuerzos compresivos generados por las fuerzas de expansión térmica son de alrededor de 200 lb/Pg^2 por cada $^{\circ}\text{F}$ incrementado.

2. El coeficiente de expansión térmica del acero es de alrededor de 7×10^{-6} por $^{\circ}\text{F}^{(2)}$.

La Fig. A.6 muestra el comportamiento térmico de la TR. La trayectoria A-B sigue un patrón elástico. B representa el punto de cedencia. Si el esfuerzo compresivo a la máxima temperatura de la TR no excede el punto B, la tubería vuelve a su punto de cero esfuerzo en tanto se enfría el sistema, sin que ocurra ningún daño. A mayores temperaturas los esfuerzos rebazan el punto de cedencia causando deformación a la tubería (comportamiento plástico).

Las propiedades de la TR se encuentran en tablas comerciales. Por ejemplo, una TR J-55 permitirá un incremento de $55,000/200$ ó 275 $^{\circ}\text{F}$ antes del punto de cedencia. La junta de la TR podría ceder (no precisamente fallar, pero si registrar un daño) antes que el cuerpo de la tubería.

3. La conductividad térmica del acero es bastante alta, alrededor de $25 \text{ Btu/hr-pie-}^{\circ}\text{F}$. Tabla A.4

4. La tabla A.2 proporciona la emisividad del acero y otros metales.

II.2.8 AISLANTE TÉRMICO

La mayoría de los pozos con procesos de inyección de vapor se aíslan con protección térmica, no sólo para reducir las pérdidas de calor sino para evitar fallas a la tubería de revestimiento. Existe una gran variedad de aislantes térmicos, todos ellos con las características de poseer un alto valor de resistividad al calor ($1/K$), entre 40 y 77 [Btu/hr-pie- $^{\circ}$ F]¹. Los de uso más frecuente son el sodio y el silicato de calcio. Tabla A.4

CAPITULO III
DESCRIPCION DEL SISTEMA DE INYECCION

III.1 SUPERFICIAL

III.1.1 GENERADOR DE VAPOR

El vapor que se ha de inyectar en un proceso de recuperación térmica se produce por generadores de vapor húmedo. Estos son aparatos que tienen tubos en forma de espiral, los hay otros con tubos lineales, dichos tubos están rodeados por flamas y gases calientes, por los cuales se les hace circular agua a altas presiones. Las flamas para calentar los tubos en la sección de radiación se obtienen con combustibles líquidos o gaseosos. Es importante, sin embargo, que el combustible líquido tenga propiedades constantes (tales como viscosidad, volatilidad y contenido de gas disuelto) para evitar paros en el sistema automático. Los generadores de vapor húmedo están equipados con instrumentos y dispositivos de control que ajustan automáticamente los gastos de combustible, aire y la alimentación de agua para generar el vapor con la calidad requerida.

Estos generadores producen alrededor de 12 a 50 millones de Btu/hr a la salida del vapor, con una presión de saturación entre 2000 y 2500 lb/pg² y una calidad del orden de 85%.

La eficiencia de un generador se puede determinar por la entalpía que produce el vapor, relativa al total de energía para generarlo. Alrededor del 20% del calor suministrado a un generador de vapor se pierde a través del sistema de escape, dejando la chimenea a aproximadamente 400 °F.

-Tratamiento del agua

El agua de alimentación a los generadores debe ser de buena calidad para evitar sólidos suspendidos en la corriente, incrustaciones y corrosión en la tubería.

El API¹⁹ recomienda las siguientes consideraciones:

Dureza total	Menos de 1 ppm
Concentración de Fe	Menos de .1 ppm
Sólidos suspendidos	Menos de 5 ppm (preferible menos de 1 ppm)
Aceite suspendido	Menos de 1 ppm
Oxígeno	Preferible 0 ppm
Alcalinidad	Bicarbonatos alcalinos menos de 2000 ppm
pH	de 7 a 12.

III.1.2 LINEAS SUPERFICIALES

Las líneas de distribución del vapor desde el generador a las cabezas de los pozos están a más altas presiones y temperaturas que las líneas de producción hacia los separadores. Si la presión del vapor es inferior a 1500 lb/pg² las líneas de producción pueden ser adecuadas para conducir el vapor.

Las líneas superficiales pueden estar enterradas, colocadas sobre el suelo, o soportadas a cierta altura del suelo. Este último diseño es preferible para instalaciones permanentes, debido a que, permite la expansión de la tubería por los cambios de temperatura. Se colocan a determinados intervalos, vueltas de expansión de la tubería (Fig. 3.1). Por ejemplo, aplicando el coeficiente de expansión del acero, si en una tubería de 1500 pies de longitud se produce un incremento de temperatura de 600 °F, el incremento en su longitud podría ser de 6.3 pies (1.92 m)

Quando las líneas son enterradas, es recomendable colocarlas con un relleno de arena en la zanja, para evitar excesivas pérdidas de calor a través del suelo húmedo.

Para el caso de líneas expuestas a la intemperie es recomendable aislarlas con protección térmica, de esta manera se reducen las pérdidas de calor (por consiguiente los gastos por consumo de combustibles) y como una medida de seguridad.

III.2 SUBSUPERFICIAL

III.2.1 TUBERIA DE REVESTIMIENTO

Una limitación bastante seria en la aplicación de un proyecto de inyección de vapor es sin duda el fallo que podría registrarse en la tubería de revestimiento por los esfuerzos térmicos generados.

En tanto la tubería se calienta tiende a elongarse en proporción directa al cambio de temperatura. En la mayoría de los pozos, cierta parte de la TR está cementada con la pared del pozo, la tendencia a la elongación entonces, es remplazada por esfuerzos compresivos. Cuando la TR está cementada sólo en la parte inferior, el pandeamiento de la misma es casi inevitable. En cualquiera de ambos casos la expansión de la tubería llega incluso a elevar el árbol de válvulas.

Una manera de prevenir daños a la tubería se logra utilizando materiales de alto punto de cedencia, ésto es, desde luego más caro.

En algunos pozos someros el vapor puede ser inyectado por el espacio anular. Sin embargo, en pozos profundos (los cuales requieren mejor calidad del vapor en la cabeza del pozo) es más conveniente inyectar por la TP para reducir la temperatura en la tubería de revestimiento.

III.2.2 TUBERIA DE INYECCION-PRODUCCION

La tubería de inyección para pozos térmicos puede ajustarse a cualquier aparejo convencional de producción bajo las siguientes características: en el extremo inferior de la tubería, en el empacador térmico, deberá colocarse una junta de expansión que permita a la sarta de tubería elongarse libremente con los incrementos de temperatura; dado que la mayoría de los pozos se perforan sin considerar una posible intervención térmica, éstos no se han diseñado para resistir las temperaturas de inyección del vapor, por lo tanto se requiere que la sarta de inyección sea aislada con protección térmica.

Cuando se inyecta en un yacimiento de gran espesor (cientos de pies) existe normalmente bastante diferencia entre la parte inferior y superior; el vapor buscará el punto de presión más baja. Esta tendencia se puede reducir colocando la TP en la parte inferior del intervalo.

III.2.3 AISLANTE TERMICO

El aislante térmico debe mantenerse seco para que sea más efectivo. Hoy día existe tubería pre-aislada que permite la expansión de sus componentes y mantiene seca la parte del aislante mediante un sellamiento.

Comercialmente también se puede encontrar aislamiento preformado, moldeado para ajustarse a la superficie de la tubería. Se fabrican en diversos diámetros (de 1/2" a 12") y espesores (1/2 a 2")⁽³⁷⁾.

Otro aislante, un fluido llamado Ken-Pack se ha usado con mucho éxito, el cual consiste de grasas ácidas, y tiene la ventaja de que se puede recuperar y ser usado nuevamente en otro pozo.

III.2.4 CEMENTACION

La cementación de un pozo debe ser completa, hasta la superficie, la razón de esto, es anclar firmemente la tubería de revestimiento con la pared del pozo. De esta manera se evita pandeo de la TR y también protege contra posible corrosión.

El cemento API clase G o H deberá usarse con: por lo menos 30% de flúor silicato, retardadores, reductores de fricción, y aditivos para controlar la pérdida de circulación y densidad de la lechada del cemento. El flúor silicato reacciona con el hidróxido de calcio para formar silicato de calcio el cual proporciona al cemento excelentes características de resistencia a la temperatura. Otros aditivos recomendables son: la perlita (1 pie³/saco), que reduce la densidad de la lechada y la conductividad térmica del cemento; la bentonita gel, la cual mejora

la mezcla entre la perlita y la lechada de cemento; y la sal común (NaCl), ésta reduce la viscosidad de la lechada, mejora la cementación con las arenas bentónicas y lutitas, y puede prevenir de derrumbes al pozo.

III.3 YACIMIENTO

III.3.1 TIPO DE TERMINACION

El tipo de terminación de un pozo para la inyección de vapor debe ser diseñada para facilitar y distribuir uniformemente el flujo del fluido a la formación; y al mismo tiempo mantener un medio de retención de arenas hacia la boca del pozo. Una técnica de terminación consiste en colocar un paquete de grava en una TR corta con perforaciones (alrededor de 6 disparos por metro). El tamaño de las perforaciones y el diámetro de los granos de grava son importantes para el control de la arena. Saucier⁽²³⁾ recomienda que la relación del tamaño medio del grano del paquete al tamaño medio del grano de la formación debe estar entre 5 y 6. Las perforaciones de la TR corta (linner) deberán ser de un tamaño que puedan retener el paquete de grava. La Fig. 3.2 muestra una terminación típica para procesos de inyección de vapor.

III.3.2 ESPESOR DEL INTERVALO PRODUCTOR

En las operaciones de inyección de vapor el espesor del intervalo productor deberá ser mayor de 50 pies, con el objeto de no perder mucho calor hacia las formaciones adyacentes.

Algunas veces es recomendable separar los intervalos productores, por ejemplo, cuando dos arenas están a diferente presión. En pruebas piloto usualmente se selecciona el intervalo o se restringe a una cierta porción del intervalo total.

ARBOL DE VALVULAS DEL POZO INYECTOR DE VAPOR

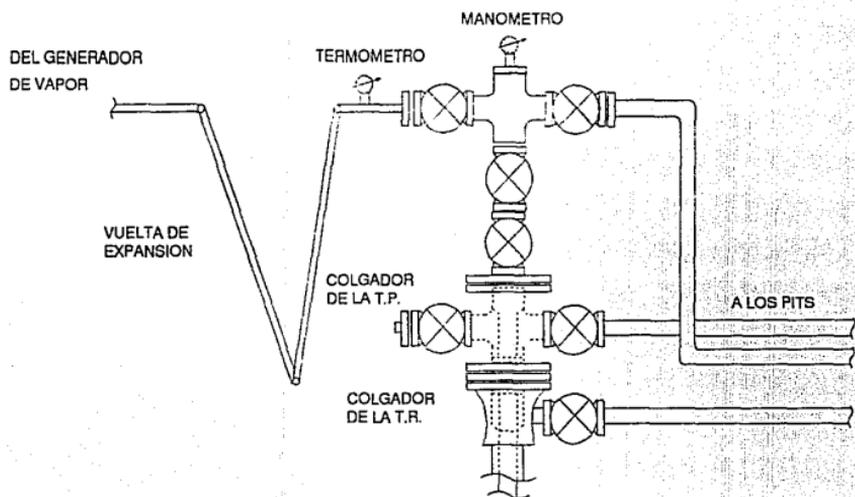


FIG. 3.1

DISEÑO DEL SISTEMA SUBSUPERFICIAL Y TERMINACION DEL POZO

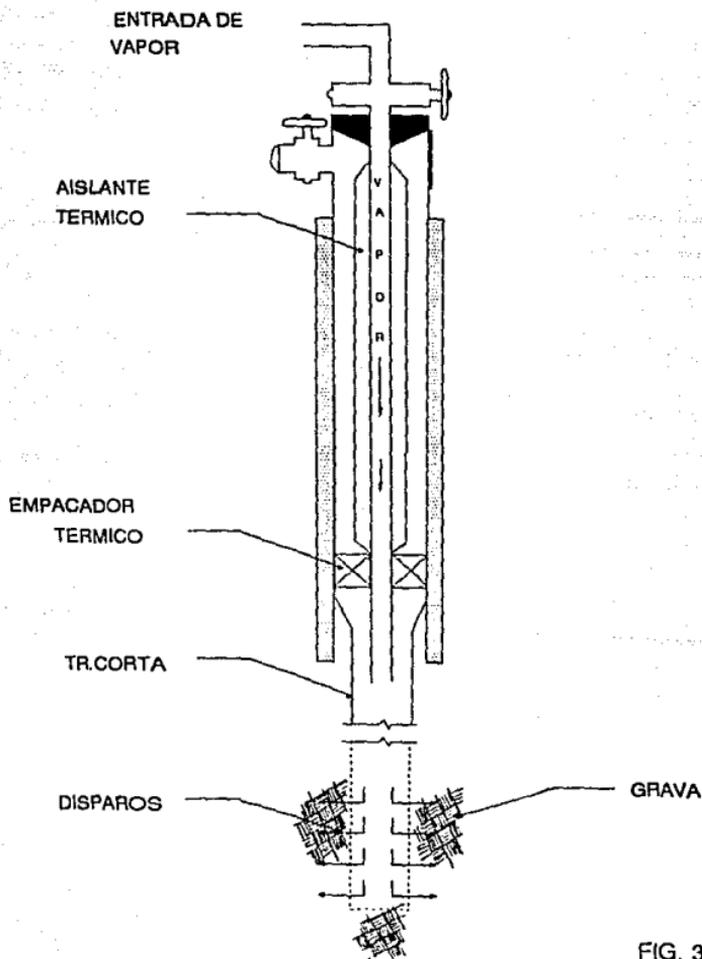


FIG. 3.2

CAPITULO IV

PERDIDAS DE CALOR EN EL SISTEMA DE INYECCION

En los procesos de inyección de vapor las variables a las que se debe prestar mayor importancia son la temperatura en la tubería de revestimiento y las pérdidas de calor a lo largo de todo el sistema de inyección.

La estimación de los cambios de temperatura, a los que la tubería de revestimiento estará sometida, facilita elegir su diseño apropiado. Evitando de esta manera altos esfuerzos térmicos que con seguridad provocarían fallas a las juntas y colapso al cuerpo de la tubería.

Las pérdidas de calor ocasionan una marcada disminución de la calidad del vapor, considerar sus efectos en un proceso de recuperación térmica, permitirá al ingeniero programar las condiciones desde el generador, para alcanzar la formación productora con un vapor con las propiedades deseadas.

El flujo de las pérdidas de calor, que se supone en régimen permanente, es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el fluido de inyección y el ambiente (atmósfera o formación) y a la longitud de la tubería, e inversamente proporcional a la resistencia térmica total del sistema.

La proporción con que el calor se transfiere a la formación se determina mediante el coeficiente total de transferencia de calor, el cual es la suma de todas las resistencias térmicas específicas del sistema. El aislante, el cemento y la tubería misma tienen una resistencia térmica que está en función de la conductividad térmica y geometría del material.

La pérdida de calor por unidad de tiempo se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Q = U_i A_w \Delta T \quad (1)$$

donde :

Q = Pérdida de calor, Btu/hr

U_r = Coeficiente total de transferencia de calor, basado en el área externa de la tubería,
Btu/hr-pie²-°F

A_{re} = Área ext. de la tubería, pie²

ΔT = Diferencia de temperatura fluido-ambiente, °F

De acuerdo a la ley de Fourier⁽¹⁴⁾ la cantidad de calor que fluye a través de un cuerpo es directamente proporcional al gradiente de temperatura en el medio. Donde el factor de proporcionalidad se define como la conductividad térmica del medio, K . Para un sistema radial:

$$Q = -2\pi r K \frac{\delta T}{\delta r} \Delta L \quad (2)$$

IV.1. PERDIDAS DE CALOR EN LINEAS SUPERFICIALES

Aunque las primeras pérdidas de calor ocurren en el generador de vapor mismo, éstas se toman en cuenta en la eficiencia térmica de la unidad. Para nuestro propósito la transferencia de calor se inicia en las líneas de conducción superficial, desde el generador de vapor a la cabeza del pozo. Todas las condiciones ambientales tienen efecto en los mecanismos de transferencia y deberán ser consideradas en el diseño del sistema de inyección.

IV.1.1 COEFICIENTE TOTAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Integrando la Ec. 2 se obtienen las ecuaciones que permiten calcular la cantidad de calor transferido por conducción en la línea y en el aislante:

En la línea:

$$Q = \frac{2\pi K_{nb}(T_n - T_{ie})\Delta L}{\ln \frac{r_{ie}}{r_n}} \quad (3)$$

En el aislante:

$$Q = \frac{2\pi K_{ins}(T_{ie} - T_{ia})\Delta L}{\ln \frac{r_{ia}}{r_{ie}}} \quad (4)$$

Hacia la atmósfera, cuando es el caso de líneas instaladas al aire libre, la transferencia de calor es por convección forzada (fuerza del viento) y por radiación, la cantidad de calor por estos dos mecanismos se expresa con la siguiente ecuación:

$$Q = 2\pi r_{ie}(h_c - h_r)(T_{int} - T_a)\Delta L \quad (5)$$

La diferencia total de temperatura entre el fluido y el ambiente es la suma de las diferencias de temperatura en cada uno de los elementos interpuestos entre el fluido y la atmósfera, es decir:

$$(T_f - T_a) = (T_f - T_n) + (T_n - T_{ie}) + (T_{ie} - T_a) \quad (6)$$

Despejando las ΔT 's de las Ecs. 1 y 3, sustituyendo en (6) y suponiendo $T_i = T_a$ se tiene la Ec.

7 que representa el coeficiente total de transferencia de calor:

$$U_{te} = \left[\frac{r_{te}}{K_{sub}} \ln \frac{r_{te}}{r_{ii}} + \frac{1}{h_c + h_r} \right]^{-1} \quad (7)$$

En forma similar, para un sistema con protección térmica:

$$U_{te} = \left[\frac{r_{te}}{K_{sub}} \ln \frac{r_{te}}{r_{ii}} + \frac{r_{ins}}{K_{ins}} \ln \frac{r_{ins}}{r_{te}} + \frac{r_{te}}{K_{ins}} \frac{1}{h_c + h_r} \right]^{-1} \quad (8)$$

Los valores de h_c y h_r se pueden determinar de las siguientes correlaciones propuestas por White⁽¹⁾.

$$h_c = \frac{\sigma \epsilon (T_s^4 - T_a^4)}{T_s - T_a} \quad (9)$$

$$h_r = 24 \frac{K}{D_i} \left[\frac{D_i V \rho}{\mu} \right]^{-0.6} \quad (10)$$

$$T_s = T_a + \Delta T_s \quad (11)$$

$$\Delta T_s = (T_f - T_a) \left[\frac{1}{\frac{r_m (h_c + h_r)}{K_m r_{in}} + \frac{1}{r_m (h_c + h_r)}} \right] \quad (12)$$

donde:

$$r_{ln} = \frac{r_m - r_{te}}{\ln \frac{r_m}{r_{te}}} \quad (13)$$

El subíndice m se refiere al medio (tubería o al aislante).

Para determinar U_e se sigue un procedimiento iterativo:

- 1 Suponer un valor de $(h_c + h_r)$
- 2 Calcular la caída total de temperatura entre el fluido y el ambiente, Ec. 12
- 3 Estimar T_1 mediante Ec. 11
- 4 Calcular h_r (Ec. 9)
- 5 Calcular h_c (Ec. 10)
- 6 Comparar el nuevo $(h_c + h_r)$ con $(h_c + h_r)$ supuesto, si se cumple una tolerancia, el procedimiento termina y se realiza el paso 7. De lo contrario se toma el nuevo valor de los coeficientes y se repite el procedimiento desde el paso 2.
- 7 Se calcula el coeficiente total de transferencia de calor, U_e con la ecuación 7 o 8.

IV.1.2 PERDIDA TOTAL DE CALOR EN TUBERIAS AEREAS

La pérdida total de calor se calcula ahora con la Ec. 1. Con lo cual se infiere la calidad del vapor en la cabeza del pozo (Calor total generado - Calor total perdido).

Calor generado:

$$Q_{gen} = H_{fg} i_v \quad (14)$$

Calor en la cabeza del pozo:

$$Q_o = Q_{gen} - Q_{per} \quad (15)$$

Entalpía del vapor húmedo en la cabeza del pozo:

$$H_g = \frac{Q_o}{i_v} \quad (16)$$

Dado que la presión de inyección se mantiene prácticamente invariable en líneas superficiales, la calidad del vapor en la cabeza del pozo, se puede calcular de la siguiente ecuación:

$$X = \frac{H_g - H_f}{H_{fg}} \quad (17)$$

Donde H_f y H_{fg} se leen de tablas de vapor a la presión de inyección.

IV.1.3. PERDIDA TOTAL DE CALOR EN TUBERIAS ENTERRADAS

Para líneas enterradas el flujo radial de calor se puede calcular con la ecuación de Ramey⁽¹⁹⁾ Ec. 18, o con la ecuación 20⁽²¹⁾, la cual toma en cuenta la profundida l, a la que esta enterrada la línea.

$$Q = \frac{2\pi K_r (T_w - T_e) \Delta Z}{f(l)} \quad (18)$$

$$f(t) = \ln \frac{2\sqrt{\alpha t}}{r_{\text{imb}}} - 0.29 \quad (19)$$

Debido a que el flujo de calor en la formación varía con el tiempo, $f(t)$ es la función transitoria de conducción de calor (Ec. 19) expresada para tiempos mayores de 7 días. Al principio del proceso de inyección de vapor se tienen grandes pérdidas de calor, posteriormente estas pérdidas decrecen con el tiempo, en tanto se incrementa la resistencia de la formación al flujo térmico.

$$Q = 2\pi K_f (T_{ic} - T_p) / \ln \frac{1.08 D_h}{D_i} \quad (20)$$

donde:

$D_h = 2 \times$ Profundidad de la zanja en la que está enterrada la línea - D_i

$D_i =$ Diámetro de la línea

IV.2 PERDIDAS DE CALOR EN EL APAREJO DE INYECCION

IV.2.1 COEFICIENTE TOTAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Los mecanismos de transferencia de calor son por conducción a través de la formación, del cemento, del aislante y de las paredes de la tubería. Por convección natural desde fluido a la cara interna de la tubería. Y por conducción, radiación y convección en el espacio anular.

Particularizando la ecuación 1 para el caso del flujo de vapor en la tubería vertical de inyección, se tiene:

$$Q = 2\pi r_{ie} U_{ie} (T_f - T_h) \Delta L \quad (21)$$

Donde:

U_{ie} = Coeficiente total de transferencia de calor referido al exterior de la tubería de producción

$(T_f - T_h)$ = Diferencia de temperatura entre el fluido y la formación

$2\pi r_{ie} \Delta L$ = área externa de la tubería de producción

Integrando (2) para determinar la cantidad de calor a través de las tuberías, del aislante y del cemento se obtienen las siguientes ecuaciones en donde Q tiene el mismo valor, suponiendo que el régimen de flujo es permanente.

en la TP

$$Q = \frac{2\pi K_{sub} (T_{ii} - T_{ie})}{\ln \frac{r_{ie}}{r_{ii}}} \Delta L \quad (22)$$

en el aislante

$$Q = \frac{2\pi K_{ins} (T_{ie} - T_{ins})}{\ln \frac{r_{ins}}{r_{ie}}} \Delta L \quad (23)$$

en la TR

$$Q = \frac{2\pi K_{cas} (T_{ci} - T_{ca})}{\ln \frac{r_{ce}}{r_{ci}}} \Delta L \quad (24)$$

en el cemento

$$Q = \frac{2\pi K_{cem}(T_{ce} - T_h)}{\ln \frac{r_h}{r_{ce}}} \Delta L \quad (25)$$

A través del espacio anular el flujo total de calor (Ec. 26) es la suma del calor transferido por cada uno de los tres mecanismos. Definiendo la cantidad de calor en términos de coeficientes parciales de transferencia de calor, h_c es el coeficiente por convección y conducción y h_r el coeficiente por radiación, basados en la superficie externa de la tubería de inyección y en la diferencia de temperatura ($T_{ie} - T_{ci}$); o en la superficie externa del aislante y en ($T_{in} - T_{ci}$), para un sistema con protección térmica.

$$Q = 2\pi r_{ie}(h_c + h_r)(T_{ie} - T_{ci}) \Delta L \quad (26)$$

Por otro lado, puesto que la diferencia de temperatura entre el fluido y la formación es igual a la suma de las diferencias de temperatura de cada uno de los elementos interpuestos entre el fluido y la formación, es decir:

$$T_f - T_h = (T_f - T_h) + (T_{ie} - T_{ie}) + (T_{ie} - T_{ins}) + (T_{ins} - T_{ci}) + (T_{ci} - T_{ce}) + (T_{ce} - T_h) \quad (27)$$

Despejando las ΔT 's de las ecuaciones 2 y de la 22 a la 26 y sustituyendo en (27) se tienen (28) y (29), tomando en cuenta que la temperatura del fluido y la del interior de la tubería es la misma ($T_f = T_h$) y que debido a la alta conductividad térmica del acero se suponen $T_{ie} = T_{in}$ y $T_{ci} = T_{ce}$.

$$U_{ie} = \left[\frac{1}{h_c + h_r} + \frac{r_{ie}}{K_{cem}} \ln \frac{r_h}{r_{ce}} \right]^{-1} \quad (28)$$

Para un sistema con aislante:

$$U_{ie} = \left[\frac{r_{ie}}{K_{ins}} \frac{\ln_{ins}}{r_{ie}} + \frac{r_{ie}}{r_{ins}(h_r' + h_c')} + \frac{r_{ie}}{K_{cem}} \ln \frac{r_h}{r_{ce}} \right]^{-1} \quad (29)$$

Donde los coeficientes h_r' y h_c' están referidos a la superficie externa del aislante y a la diferencia de temperatura (T_{in} , T_{ei}) y pueden evaluarse de la siguiente manera:

El flujo de calor exclusivamente por radiación en el espacio anular esta dado por (30):

$$Q_r = 2\pi r_{ie} h_r (T_{ie} - T_{ei}) \Delta L \quad (30)$$

y por la ley de Stefan-Boltzman⁽¹⁶⁾:

$$Q_r = 2\pi r_{ie} \sigma F_{ei} (T_{ie}^4 - T_{ei}^4) \Delta L \quad (31)$$

Igualando (30) y (31) y factorizando se tiene:

$$h_r = \sigma F_{ei} (T_{ie}^2 + T_{ei}^2) (T_{ie} - T_{ei}) \quad (32)$$

Donde:

$\sigma = 1.713 \times 10^{-9}$, constante de Stefan-Boltzman, Btu/ft²-hr-°R

F_{ei} es un factor de emisividad que representa la fracción de radiación emitida por la cara externa de la TP e interceptada por la cara interna de la TR, este factor geométrico se puede calcular con la Ec. 33

$$F_{act} = \left[\frac{1}{e_{te}} + \frac{r_{te}}{r_{ci}} \left(\frac{1}{e_{ci}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (33)$$

La transferencia de calor por conducción y convección natural en el espacio anular esta dada por la Ec. 34

$$Q_c = \frac{2\pi K_{hc} (T_w - T_{ci})}{\ln \frac{r_{ci}}{r_{te}}} \quad (34)$$

Donde:

El coeficiente por conducción y convección estaría dado por:

$$h_c = \frac{K_{hc}}{r_m \ln \frac{r_{ci}}{r_{te}}} \quad (35)$$

K_{hc} , conductividad térmica equivalente del fluido en el espacio anular, Btu/hr-ft²-°F. La Ec. 36 es una correlación en función del número de Grashof⁽²⁹⁾ y el número de Prandtl⁽²⁹⁾ calculados a partir de (37) y (38) respectivamente.

$$K_{hc} = K_{hd} (0.49 (Gr \times Pr)^{0.333} Pr^{0.74}) \quad (36)$$

$$Gr = \frac{(r_{ci} - r_{te})^3 g \rho_{an} \beta (T_w - T_{ci})}{\mu_{an}^2} \quad (37)$$

$$Pr = \frac{C_{an} \mu_{an}}{K_{hd}} \quad (38)$$

K_{fa} es la conductividad térmica del fluido en es espacio anular.

El flujo radial de calor en la formación está definido por las ecuaciones de Ramey⁽¹⁹⁾:

$$Q = \frac{2\pi K_f (T_h - T_p) \Delta Z}{f(t)} \quad (39)$$

$$f(t) = \ln \frac{2\sqrt{\alpha t}}{r_h} - 0.29 \quad (40)$$

Analogamente al flujo de vapor en líneas superficiales, el procedimiento para calcular el coeficiente total de transferencia de calor implica un proceso iterativo. Sin embargo, para líneas verticales, deberá considerarse la variación de la temperatura tanto en el fluido como en la formación con respecto a la profundidad. Las temperaturas T_{in} , T_{ci} y T_h se calculan con las siguientes ecuaciones:

Igualando (21) y (22) para un sistema con aislante ($T_i - T_{in}$):

$$T_{in} = T_w - \frac{r_{ie} U_{ie}}{K_{inx}} \ln \frac{r_{inx}}{r_{ie}} (T_w - T_h) \quad (41)$$

De las ecuaciones 21, 23 y 24, despreciando la resistencia térmica de la tubería debido a su alta conductividad térmica:

$$T_{ci} = T_h + \frac{r_{ie} U_{ie}}{K_{cem}} \ln \frac{r_h}{r_{ce}} (T_w - T_h) \quad (42)$$

Igualando las Ecs. 21 y 39, haciendo $\Delta Z = h$, se tiene la siguiente ecuación:

$$T_h = \frac{T f(\rho) + \frac{K_e}{r_w U_w} T_s}{f(\rho) + \frac{K_e}{r_w U_w}} \quad (43)$$

IV.2.2 VARIACION DE LA PRESION Y LA CALIDAD DEL VAPOR CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD

La transferencia de calor en el pozo está en función de la diferencia de temperatura fluido-formación, pero, ambas temperaturas varían con respecto a la profundidad del pozo. La temperatura del fluido puede determinarse por correlaciones con la presión y calidad del mismo. La de la formación con un gradiente geotérmico.

Las Ecs. 44 y 45 definen el comportamiento termodinámico del vapor dentro de la tubería, en cualquier punto entre la boca y el fondo del pozo^(13,17).

$$\frac{\delta P}{\delta Z} = \frac{\frac{\delta Q}{\delta Z} + \frac{\delta X}{\delta V} \left(\frac{fV}{2D_i} - \frac{g}{G^2 V} \right) + \frac{fG^2 V^2}{2JgD_i}}{\frac{\delta H}{\delta P} - \frac{V}{J} - \frac{\delta X}{\delta V} \left(\frac{g}{G^2} + \frac{\delta V}{\delta P} \right)} \quad (44)$$

$$\frac{\delta X}{\delta Z} = \frac{\frac{\delta Q}{\delta Z}(1+\gamma) + \frac{1}{J}(\gamma + \frac{fG^2V^2}{2gD_1})}{\frac{\delta H}{\delta X}(1+\gamma) + \gamma \frac{G^2V}{Jg} \frac{\delta V}{\delta X}} \quad (45)$$

Donde:

$$\gamma = \frac{\frac{V}{J} \frac{\delta H}{\delta P}}{\frac{\delta H}{\delta P} + \frac{G^2V}{Jg} \frac{\delta V}{\delta P}}$$

El desarrollo de estas ecuaciones y su método de solución ⁽⁴⁾se encuentran en el apéndice B.

A) VARIACION DEL CALOR PERDIDO POR UNIDAD DE MASA CON LA PROFUNDIDAD

de las Ecs. 39 y 43, se tiene:

$$\frac{\delta Q}{\delta Z} = \frac{2\pi r_{ie} U_{ie}}{Q_i} [115.1P - 225 \frac{K_{he} T_e + 115.1P - 225 r_{ie} U_{ie} f(t)}{K_{he} + r_{ie} U_{ie} f(t)}] \quad (46)$$

La temperatura de la formación, T_f :

$$T_f = T_e + aZ \quad (47)$$

donde a corresponde al gradiente geotérmico de la región.

B) VARIACION DEL VOLUMEN ESPECIFICO CON RESPECTO A LA PRESION Y A LA CALIDAD

El volumen específico del vapor húmedo V , es la suma de los volúmenes del vapor seco y del líquido suspendido:

$$V = \frac{X}{100} V_s + \left(1 - \frac{X}{100}\right) V_w \quad (48)$$

De correlaciones de Farouq Ali^(9,11), que proporcionan buenos valores para un rango de presiones entre 15 y 1000 psia.

$$V_s = 363.9 P^{-.9588} \quad (49)$$

$$V_w = .01587 + .000086 P^{.225} + .0002 P^{.45} \quad (50)$$

sustituyendo las Ecs. 49 y 50 en 48, se tiene:

$$V = \frac{X}{100} (363.9 P^{-.9588}) + \left(1 - \frac{X}{100}\right) (.01587 + .000086 P^{.225} + .0002 P^{.45}) \quad (51)$$

Derivando (51) con respecto a P y a X

$$\frac{\delta V}{\delta P} = \left[\frac{3.48907X}{P^{1.9588}} + \left(1 - \frac{X}{100}\right) \left(.01587 + \frac{.000019}{P^{.775}} + \frac{.00009}{P^{.55}} \right) \right] / 144 \quad (52)$$

$$\frac{\delta V}{\delta X} = 3.639 P^{-.9588} - .00000086 P^{.225} - .00000 P^{.45} \quad (53)$$

C) VARIACION DE LA ENTALPIA CON RESPECTO A LA PRESION Y A LA CALIDAD

Entalía del vapor húmedo:

$$H = h + \frac{X}{100} L \quad (54)$$

Entalpia del agua:

$$h = 91P^{.2574} \quad (55)$$

Calor latente de vaporización:

$$L = 1318P^{.08774} \quad (56)$$

sustituyendo (55) y (56) en (54), se tiene:

$$H = 91P^{.2574} + \frac{X}{100} 1318P^{.08774} \quad (57)$$

derivando la Ec. 57 con respecto a la presión y a la calidad:

$$\frac{\delta H}{\delta P} = (23.4234P^{-.7426} - 1.1564XP^{-1.08774})/144 \quad (58)$$

$$\frac{\delta H}{\delta X} = 13.18P^{-.08774} \quad (59)$$

D) DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE FRICCION

El factor de fricción se lee del diagrama de Moody⁽¹²⁾ (Fig. A.7) con los valores del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería, los cuales se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$Re = 6.317 \frac{Q_i}{\mu_w D_i} \quad (60)$$

$$Rug. Rel. = \frac{0.0018}{D_i} \quad (61)$$

.0018 es la rugosidad relativa de la tubería comercial de acero de carbono.

Por la correlación de Farouq Ali⁽¹⁸⁾, la viscosidad del vapor húmedo:

$$\mu_{ws} = \frac{X}{100} \mu_s + \left(1 - \frac{X}{100}\right) \mu_w \quad (62)$$

La viscosidad del agua y la del vapor seco se calculan mediante la ecuación de Hawkins y la de Kestín y Richardson⁽²⁷⁾ respectivamente.

$$\mu_w = \frac{2.185}{.04012T + .000005147T^2 - 1} \quad (63)$$

$$\mu_s = [82.2516 + .17815T + .00006597T^2 - \rho_v(31.45 - .055237)] \times 10^{-4} \quad (64)$$

La densidad del vapor se calcula con la correlación propuesta por Farouq Ali:

$$\rho_v = .00274554278 P^{.9588} \quad (65)$$

IV.2.3 PERDIDA TOTAL DE CALOR

La pérdida total de calor se puede determinar ahora con la Ec. 66 en función de la presión y la calidad del vapor, en un punto a la profundidad Z.

$$Q = 91P^{.2574} + \frac{13.18X}{p^{.08774}} - 91P_{iny}^{.2574} - \frac{13.18X_{iny}}{P_{iny}^{.08774}} - \frac{Z}{J} + \frac{G^2}{2gJ}(V_{\bullet}z^2 - V_{\bullet}c.s.^2) \quad (66)$$

o con la ecuación 1, tomando el coeficiente total de transferencia de calor.

IV.3 PERDIDAS DE CALOR HACIA LAS FORMACIONES ADYACENTES

La mayor cantidad de calor que se pierde en cualquier proceso de recuperación térmica es a los estratos adyacentes a la formación productora. Aunque la conductividad térmica de la tierra es baja, las áreas involucradas son grandes.

Para estimar el calor perdido a los estratos superior e inferior a la formación productora, los modelos matemáticos de Marx-Langenheim y Rubenshtein^(16,22) hacen las mismas suposiciones: la base y el casquete del yacimiento son geoméricamente iguales, hidráulica y térmicamente homogéneos, isotrópicos y que se puede despreciar la transferencia de calor radial. Además, suponen que únicamente el banco de vapor desplaza los fluidos del yacimiento y que los fluidos son incompresibles.

El mecanismo de transferencia de calor es por conducción transitoria.

Haciendo un balance de calor, para determinar el volumen calentado por una cantidad de vapor dada, se tiene el calor hacia los estratos y el calor utilizado en la formación.

Calor inyectado = Calor perdido - Calor utilizado

El calor perdido Q , se puede calcular con la Ec. 67

$$Q = 2 \int_0^{A_m} \frac{K \Delta T}{\sqrt{\pi \alpha t}} dA \quad (67)$$

donde A_m es el área calentada al tiempo, t .

El calor perdido al tiempo $u(u, t)$ correspondiente al elemento de área dA sería:

$$\frac{K \Delta T}{\sqrt{\pi \alpha (t-u)}}$$

Dado que el área que se calienta está función del tiempo, se puede escribir:

$$dA = \frac{dA}{du} du$$

Entonces el calor total perdido al tiempo t es:

$$Q_L = 2 \int_0^t \frac{K \Delta T}{\sqrt{\pi \alpha (t-u)}} \frac{dA}{du} du \quad (68)$$

El calor requerido para calentar la formación se determina por la siguiente ecuación:

$$Q_r = h \frac{dA}{dt} M \Delta T \quad (69)$$

donde: h = espesor de la formación, pies

M = Capacidad calorífica de la formación (Ec. A. 18)

Btu/pie³-°F

sumando ambas partes:

$$Q = 2 \int_0^t \frac{K \Delta T}{\sqrt{\pi \alpha (t-u)}} \frac{dA}{du} du + M h \Delta T \frac{dA}{dt} \quad (70)$$

Resolviendo esta ecuación por la transformada de Laplace para $A_{(0)} = 0$, se tiene la siguiente⁽¹¹⁾.

$$A_{(0)} = \left[\frac{Q M h \alpha}{4 K^2 \Delta T} \right] \left[e^{-x^2} \operatorname{erfc}(x) + 2 \frac{x}{\sqrt{\pi}} - 1 \right] \quad (71)$$

$$x = \left[2 \frac{k}{M h \sqrt{\alpha}} \right] t^{1/2} \quad (72)$$

La Fig. A.5 muestra la gráfica de la función error dada por Marx-Langenheim⁽¹⁶⁾.

Ramey⁽¹¹⁾ definió el tiempo adimensional para esta presentación, elevando a la segunda potencia

x , y haciendo $\alpha = K^2/M^2$

$$t_d = 4 \alpha \frac{t}{h^2} \quad (73)$$

Ramey graficó la pérdida de calor hacia los estratos adyacentes como una función del calor total inyectado, Fig. A.8 basado en el modelo de Rubenshtein⁽²²⁾

El mismo modelo de Marx-Langenheim se puede usar para estimar la producción de aceite en un proyecto de empuje por vapor (Ec. 74).

$$V_o = 4.273 \left[\frac{i_v \phi (S_o - S_{or})}{M \Delta T} \right] e^{x^2} \operatorname{erfc}(x) \quad (74)$$

PERDIDAS DE CALOR EN EL SISTEMA DE INYECCION DE VAPOR

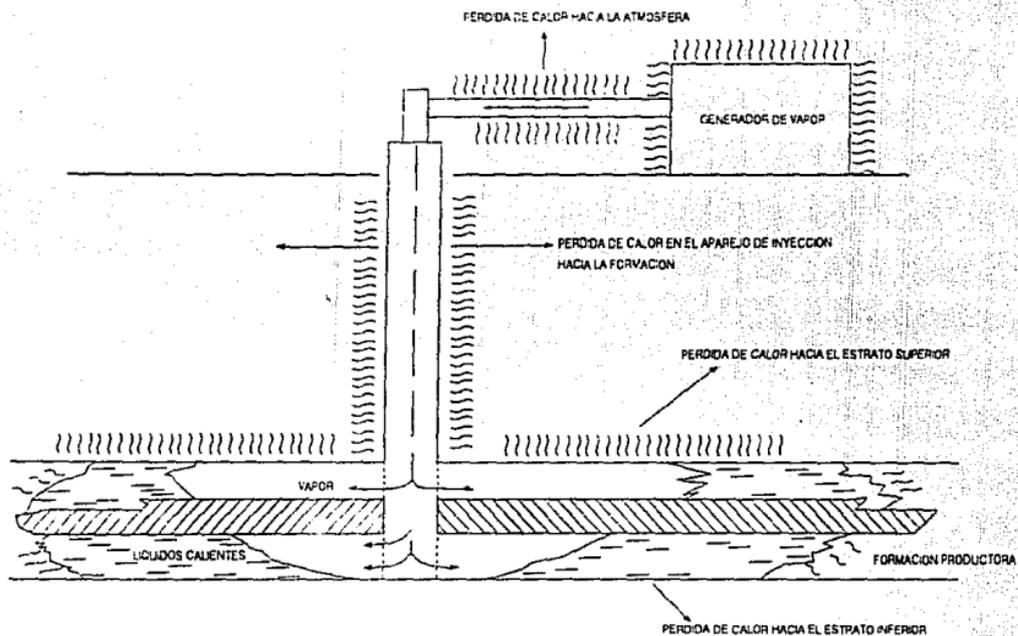


FIG. 4.1

CONFIGURACION DEL POZO

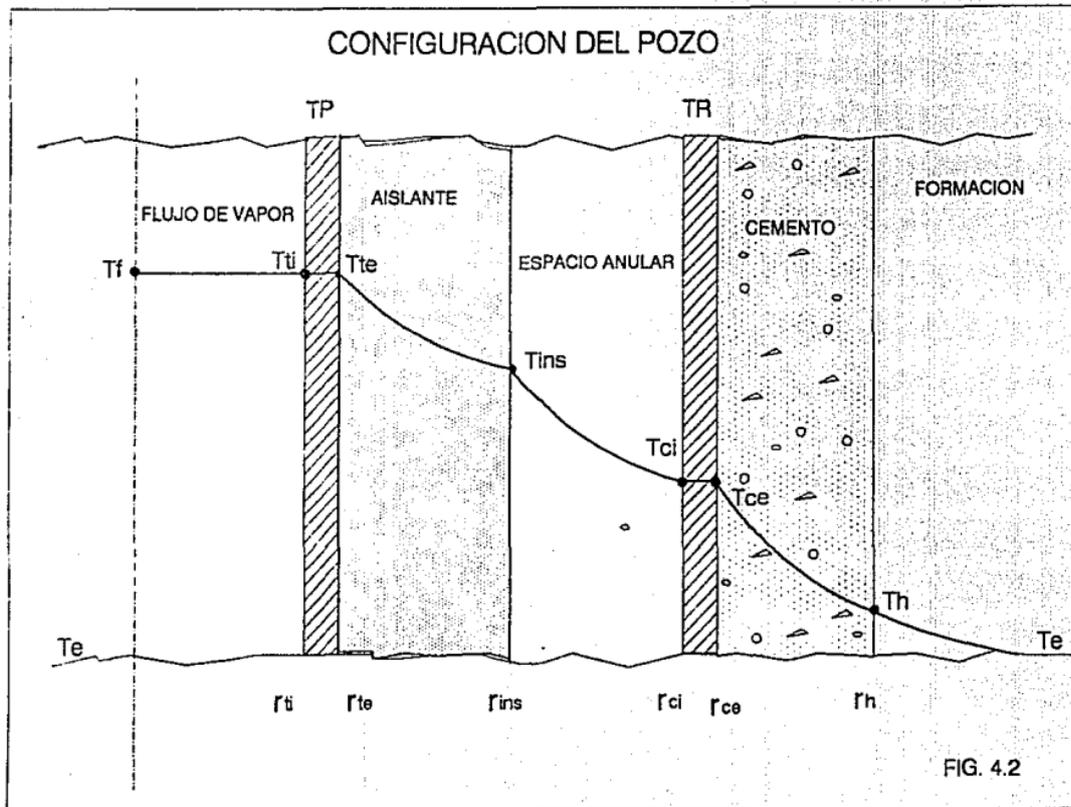


FIG. 4.2

IV.4 PROGRAMA DE COMPUTO

El objetivo principal del programa de cómputo de este modelo matemático es estimar la cantidad de calor que se pierde desde la salida de vapor del generador hasta los estratos adyacentes a la formación productora y cuantificar el aceite desplazado en la formación en el proceso de inyección de vapor.

El programa está dividido en tres partes, seis subrutinas y tres funciones. Está codificado en BASIC, se utilizó QB 4.5, en una computadora AT-386.

PROGRAMA FUENTE:

- A) La primera parte realiza las operaciones para determinar el coeficiente total de transferencia de calor en líneas superficiales aéreas con y sin protección térmica, calcula la cantidad de calor perdido para ese diseño y también, para el caso de líneas enterradas⁽¹⁸⁾ e imprime resultados.
- B) Posteriormente con los resultados de la primera parte (valores iniciales) simula la variación de la presión y la calidad del vapor en el aparejo de líneas verticales. Determina el coeficiente total de transferencia de calor⁽²⁰⁾ y por consiguiente: la pérdida total de calor para cada intervalo de longitud del pozo. El sistema puede ser aislado o no, con protección térmica. Imprime resultados.
- C) La parte final del programa estima el porcentaje de calor perdido a los estratos adyacentes a la formación productora por medio de la solución planteada por Rubenshtein⁽²²⁾; determina la cantidad de aceite desplazado en la formación con la ecuación de Marx-Langenheim⁽¹⁸⁾. Imprime resultados.

SUBRRUTINAS

- Sub. *Entalpia*. Esta subrutina, para una presión dada, toma 4 parejas de valores presión-entalpía de un conjunto de datos leídos de tablas de vapor para presiones de saturación en un rango de 500 a 1500 lb/pg². Entrega un valor de entalpía interpolado.
- Sub. *Ctransfer*. Subrutina que utiliza un proceso iterativo para obtener por ensaye y error el coeficiente total de transferencia de calor para los intervalos de profundidad del sistema de tuberías verticales.
- Sub. *Cfricción*. Con los valores del número de Reynolds y de rugosidad relativa de la tubería para el sistema vertical de inyección, esta subrutina entrega un coeficiente de fricción interpolado de una serie de valores leídos del diagrama de Moody⁽¹²⁾.
- Sub. *Rubenshtein*. De un arreglo de valores leídos de la gráfica del modelo de Rubenshtein, esta subrutina obtiene por interpolación el porcentaje de calor perdido en los estratos adyacentes, a partir de las características del yacimiento.
- Sub. *Erfex*. Entrega un valor interpolado de datos de la función error para valores calculados con el modelo de Marx-Langenhein.
- Sub. *Spline*. Por medio de esta subrutina se determinan los coeficientes de un polinomio cúbico para un número N de parejas de valores⁽¹⁾.
- Función Seval*. Interpola para un valor dado, con los coeficientes del polinomio cúbico obtenidos por Splines.
- Funciones Derpz y Derxz*. Evalúan las funciones derivadas de la presión y la calidad del vapor respectivamente.

COMENTARIOS

En este trabajo se hicieron las siguientes consideraciones:

- Tiempos de inyección del vapor mayores a 7 días. Por razones de que en la mayoría de los proyectos de inyección de vapor, incluso en la inyección cíclica, los períodos de inyección rebazan los siete días.
- Las propiedades térmicas de la tierra no varían con la profundidad.
- Se desprecia el coeficiente de transferencia de calor por convección en el fluido, por corresponder a la misma temperatura del fluido de inyección.
- Debido a la alta conductividad térmica del acero, las temperaturas en el exterior e interior de las tuberías se suponen iguales.
- Para determinar el coeficiente de fricción, los valores de rugosidad relativa de la tubería y el número de Reynolds corresponden a casos de flujo de vapor.
- Las propiedades del vapor (entalpías) obtenidas de tablas fueron leídas para un rango de presión de 500 a 1500 lb/pg₂.
- Los espesores de aislante térmico en las tuberías de inyección del vapor corresponden a los nominales⁽¹⁷⁾.

```

DECLARE SUB CTRANSFER (A, B, Utc(), rta, rfm(), rcl, rce, rh, Iv(), Tins(), Tc(), Te(), ft, Ke, Kins, Kcom, Kha, Etc, Ecl, Eins, slg
DECLARE SUB CFRICCION (B, DNRc(), DRug(), DFF(), Iv(), P(), X(), rti, Qi, FF)
DECLARE SUB SPLINE (M, Xc(), Y(), B(), C(), D())
DECLARE FUNCTION SEVAL (M, V, Xk(), Y(), B(), C(), D())
DECLARE FUNCTION DERPZ (P, X, Z, Vz, rta, Qi, Om, Te, Ke, U, ft, Jo, g, FF)
DECLARE FUNCTION DERXZ (P, X, Z, Vz, rta, Qi, Om, Te, Ke, U, ft, Jo, g, FF)
DECLARE SUB ERFCX (fx, Dfx(), Dfrcx(), erfxc)
DECLARE SUB RUBENSHEIN (lgtd, Dlgtd(), Dheat(), heatc)
DECLARE SUB ENTALPIA (pi, DP(), Dhf(), Dhfg(), hf, hfg)
CLS

```

```

* PROGRAMA PARA ESTIMAR LAS PERDIDAS DE CALOR EN UN SISTEMA
* DE INYECCION DE VAPOR EN PROCESOS DE RECUPERACION TERMICA

```

```

* ESTE PROGRAMA CONSTA SE LAS SIGUIENTES PARTES:

```

- * 1. ESTIMA LAS PERDIDAS DE CALOR EN LAS LINEAS DE CONDUCCION SUPERFICIAL TANTO EN TUBERIAS AEREAS CON Y SIN PROTECCION TERMICA COMO EN TUBERIAS ENTERRADAS
- * 2. SIMULA LA VARIACION DE LA PRESION Y LA CALIDAD DEL VAPOR Y ESTIMA LA PERDIDA PERDIDA TOTAL DE CALOR EN EL SISTEMA VERTICAL DE INYECCION
- * 3. CALCULA LA PERDIDA TOTAL DE CALOR HACIA LA FORMACION ADYACENTE Y ESTIMA LA CANTIDAD DE ACELITE DESPLAZABLE EN LA FORMACION PRODUCTORA

```

DIM rins(30), drins(30), Tc(30), Iv(30), Tins(30), Te(30), Vz(30), Q(30), Utc(30)
DIM DNRc(27), DRug(5), DFF(27, 5), Xc(10)
DIM P(30), X(30), Z(30), FP(30), fx(30), PP(30), XP(30), PC(30), XC(30)
DIM Dlgtd(13), Dheat(13), Dlx(27), Dfrcx(27), Qad(10), gnet(10), Vo(10)
DIM DP(36), Dhf(36), Dhfg(36), Tc(10), Utc(10), Qwh(10), Qsf(10)

```

```

PRINT " ENTRADA DE DATOS GENERALES DEL SISTEMA:"

```

```

PRINT

```

```

INPUT " Gasto de inyección del vapor (lb/hr) " ; Q1
INPUT " Tiempo de inyección (años) " ; t
INPUT " Longitud de las líneas en la superficie (pies) " ; L1
INPUT " Longitud de la tubería de producción (pies) " ; L2
INPUT " Calor específico del fluido en el espacio anular (Btu/lb-°F) " ; Cw
INPUT " Calor específico del agua (Btu/lb-°F) " ; Cw
INPUT " Calor específico del aire (Btu/lb-°F) " ; Ca
INPUT " Densidad del fluido en el espacio anular (lb/pie3) " ; rhoan
INPUT " Viscosidad del fluido en el espacio anular (lb/pie-hr) " ; muan
INPUT " Viscosidad del aire (lb/pie-hr) " ; mua
INPUT " Velocidad del aire (millas/hr) " ; Va
INPUT " Espesor del estrato productor (pies) " ; h
INPUT " Saturación inicial de aceite (%) " ; Soi
INPUT " Saturación residual de aceite (%) " ; Sor
INPUT " Porosidad del estrato productor (%) " ; por
INPUT " Capacidad calorífica de la tierra (Btu/pie3-°F) " ; M
INPUT " Difusividad térmica de la tierra (pie2/hr) " ; alpha
CLS

```

```

PRINT " DIAMETROS (Pg)"

```

```

PRINT

```

```

INPUT " Exterior de la línea superficial " ; dse
INPUT " Interior de la línea superficial " ; dsi
INPUT " Exterior de la tubería de producción " ; dte
INPUT " Interior de la tubería de producción " ; dti
INPUT " Exterior de la tubería de revestimiento " ; dce
INPUT " Interior de la tubería de revestimiento " ; dci

```

```

INPUT " Poca" "": de
PRINT
PRINT " SELECCIONE GRADO DE TUBERIA"
PRINT
PRINT " 1) F-25 2) N-40 3) J-55 4) N-80 5) P-110"
PRINT
INPUT " TECLAE EL NUMERO 1, 2, 3, 4 o 5" "": DP
PRINT
PRINT " CONDUCTIVIDADES TERMICAS (Btu/hr-pie-WF)"
PRINT
INPUT " Cemento" "": Ecom
INPUT " Aislante" "": Kins
INPUT " Fluido en el espacio anular" "": dha
INPUT " Tierra" "": Ke
INPUT " Aire" "": Ka
INPUT " Tubería" "": Etub
CLS
PRINT " EMISIVIDADES TERMICAS (adimensional)"
PRINT
INPUT " Exterior de la tubería de producción" "": Ete
INPUT " Interior de la tubería de revestimiento" "": Eci
INPUT " Aislante" "": Eins
PRINT
PRINT " CONDICIONES INICIALES"
PRINT
INPUT " Temperatura ambiente (WF)" "": Ta
INPUT " Temperatura en la superficie del suelo (WF)" "": Ts
INPUT " Presión del vapor de inyección (lb/pg^2)" "": Pi
INPUT " Calidad del vapor de inyección ( % )" "": Xi
INPUT " Longitud de los intervalos (pies)" "": deItaz
Z(0) = 0

```

ESPEORES NOMINALES DE AISLANTE (Pg)

```

drins(1) = .125
drins(2) = .1875
drins(3) = .25
drins(4) = .375
drins(5) = .5
drins(6) = .75
drins(7) = 1
drins(8) = 1.5
drins(9) = 2

```

RADIOS (Pies)

```

rai = dci / 2 / 12
rae = dee / 2 / 12
rti = dti / 2 / 12
rte = dte / 2 / 12
rci = dci / 2 / 12
rce = dce / 2 / 12
rh = de / 2 / 12
NUMERO DE INTERVALOS
N2 = L2 / deItaz

```

CONSTANTES

```

sigma = 1.173E-09 " Constante de Stefan-Boltzman (Btu/hr-pie^2-hR^4) "": sigma
g = 32.17 " Aceleración de la gravedad (pie/seg^2) "": g
Grav = 4.17E+08 " Aceleración de la gravedad (pie/hr^2)
Je = 778 " Equivalente mecánico del calor (lb-pie/Btu)

```


DATA -3,-2.5,-2,-1.5,-1,-.5,0,.5,1,1.5,2,2.5,3

DATA 2,3.07,4.615,7.384,11.538,21.538,34,51.538,69.230,81.384,87.692,92.307,94.615

* DATOS DE LA FUNCION ERROR DEL MODELO DE MARK-LANGENHEIM

DATA 0, .1, .2, .3, .4, .5, .6, .7, .8, .9, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 6, 7, 8, 9, 10

DATA 1, .8965, .8090, .7346, .6708, .6157, .5678, .5259, .4891, .4565, .4276, .3678, .3216, .2850

DATA .2554, .2311, .2108, .1790, .1553, .1370, .1225, .1107, .0928, .0798, .0699, .0623, .05614

* ENTRADA DE DATOS DE ENTALPIA

FOR I = 1 TO 36

READ DP(I)

NEXT I

FOR I = 1 TO 36

READ DHf(I)

NEXT I

FOR I = 1 TO 36

READ DHfg(I)

NEXT I

* ENTRADA DE DATOS PARA EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

FOR I = 1 TO 27

READ DNRe(I)

NEXT I

FOR I = 1 TO 5

READ DRug(I)

NEXT I

FOR I = 1 TO 27

FOR J = 1 TO 5

READ Dff(I, J)

NEXT J

NEXT I

* ENTRADA DE DATOS DEL MODELO DE RUBEWSHTEIN

FOR I = 1 TO 13

READ Digt(I)

NEXT I

FOR I = 1 TO 13

READ Dheat(I)

NEXT I

* ENTRADA DE DATOS DEL MODELO DE MARK-LANGENHEIM

FOR I = 1 TO 27

READ Dfxc(I)

NEXT I

FOR I = 1 TO 27

READ Dfrxc(I)

NEXT I

* 1. PERDIDAS DE CALOR EN LAS LINEAS SUPERFICIALES DE INYECCION,

* DESDE LA SALIDA DEL VAPOR DEL GENERADOR HASTA EL ARBOL

* DE VALVULAS DEL POZO

* A) TUBERIAS AEREAS

CALL ENTALPIA(Q1, CP(), Dhf(), Dhfg(), hf, hfg)

CALOR TOTAL A LA SALIDA DEL GENERADOR DE VAPOR EN FUNCION DE LA CALIDAD Y PRESION DEL VAPOR

$Hg = hf + x1 / 100 * hfg$

$Q_{tot} = Hg * Q1$

$i = 0$

$drins(0) = 0$

SE ADICIONA AISLANTE TERMICO A LA TUBERIA

$rins(i) = rse + drins(i) / 12$

$U = 4$

PROCESO ITERATIVO PARA CALCULAR EL COEFICIENTE TOTAL DE TRANSFERENCIA

DE CALOR. TUBERIA CON Y SIN PROTECCION TERMICA

DO

$Us = U$

$fact = 1 / (Us * rins(i))$

$Tf = 115.1 * P1 ^ .225$

$Dtm = (Tf - Ta) * (fact / (LOG(rins(i) / rse) / Kins + fact))$

$Ts(i) = Ta + Dtm$

IF $i = 0$ THEN

$E = Ete$

ELSE

$E = Eins$

END IF

$hr = 1.713E-09 * E * ((Ts(i) + 460) ^ 4 - (Ta + 460) ^ 4) / (Ts(i) - Ta)$

$Tav = (Ts(i) + Ta) / 2$

$rhoa = 39.734 / (Tav + 460)$

$hc = .24 * Ka / (2 * rins(i)) * (2 * rins(i) + 5280 * Va * rhoa / mas) ^ .6$

$U = hr + hc$

$DIF = ABS(U - Us)$

LOOP UNTIL DIF < .001

IF $i = 0$ THEN

$Uto(i) = (rse / Ktub * LOG(rse / rsi) + 1 / (hc + hr)) ^ -1$

ELSE

$Uto(i) = (rse / Ktub * LOG(rse / rsi) + rse / Kins * LOG(rins(i) / rse) + rse / (rins(i) * (hc + hr))) ^ -1$

END IF

CALOR PERDIDO A LO LARGO DE TODA LA LINEA SUPERFICIAL

$Qper(i) = 2 * 3.1416 * rse * Uto(i) * (Tf - Ta) * L$

CALOR EN LA CABEZA DEL POZO (ARBOX DE VALVULAS)

$Dwh(i) = Q_{tot} - Qper(i)$

ENTALPIA DEL VAPOR HUMEDO EN LA CABEZA DEL POZO

$Hg(i) = Dwh(i) / Q1$

CALIDAD DEL VAPOR EN LA CABEZA DEL POZO

$x1(i) = (Hg(i) - hf) / hfg * 100$

PORCENTAJE TOTAL DE CALOR PERDIDO EN EL SISTEMA SUPERFICIAL

$Qper(i) = Qper(i) / Q_{tot}$

$i = i + 1$

IF $i < 10$ THEN GOTO 1

5) TUBERIAS ENTERRADAS

CON LA FUNCION DE RAMEY SE CALCULA EL CALOR PERDIDO EN LINEAS ENTERRADAS

PARA TIEMPOS DE INYECCION MAYORES DE 7 DIAS

```

ft = LOG(2.* SQR(alona * t * 2c) / rae) - .29
Ora = 2 * 3.1416 * Ke * (Tf - Ta) / tt * L1
Ouh = Otot - Ora
Hg = Ouh / O1
X = (Hg - hf) / hfg * 100
PRINT ; PRINT ; PRINT
PRINT USING "PRESION INT. ### PSIA SAT. ACEITE ### % DIAM. TP ##.## PG #: Pi; Sol; dte
PRINT USING "CALIDAD INT. ##.## % H ### PIE DIAM. TR ##.## PG #: Xi; h; dce
PRINT USING "GASTO INT. ##### LB/HR POR. ### X DIAM. POZO ##.## PG #: Oj; por; dh
PRINT USING "TIEMPO INT. #### DIAS K AISL. .## LB/HR-PIE-F E.TUB ##.## #: t; Kirw; Ete
PRINT ; PRINT
PRINT = R E S U L T A D O S =
PRINT = EN EL SISTEMA SUPERFICIAL DE INYECCION =
PRINT
PRINT "GENERADOR DE VAPOR:"
PRINT
PRINT = CALOR TOTAL GENERADO"
PRINT = Q = #: Otot; "(Btu/hr)"
PRINT
INPUT "CONTINUO?"; OPS
IF OPS = "N" OR OPS = "n" THEN GOTO 6
CLS
PRINT "TUBERIAS AEREAS:"
PRINT
PRINT "ESPESOR TEMP.EXT. CALOR CALOR EN LA CALIDAD VAPOR"
PRINT "AISLANTE TUBERIA PERDIDO CABEZA POZO CABEZA POZO "
PRINT TAB(1); STRING$(64, "-")
PRINT "[Pg] [ #] [Q] [Btu/hr] [ % ] "
PRINT TAB(1); STRING$(64, "-")
FOR I = 0 TO 9
IF I = 1 THEN
PRINT TAB(1); STRING$(64, "-")
ELSE
END IF
PRINT USING "#.### ##.## ##.## #####.## ##.##"; drln(i); Ts(i); Opc(i); Ouh(i); X'(i)
NEXT I
PRINT
PRINT "TUBERIAS ENTERRADAS: "
PRINT
PRINT = CALOR TOTAL PERDIDO"
PRINT = Q = #: Ora; "(Btu / hr) "
PRINT
PRINT = CALIDAD EN LA CABEZA DEL POZO"
PRINT = X = #: X; "(%) "
PRINT ; PRINT ; PRINT
INPUT "CONTINUO?"; OPS
IF OPS = "N" OR OPS = "n" THEN GOTO 6

```

2. PERDIDAS DE CALOR EN EL APAREJO VERTICAL DE INYECCION,
DESDE EL ARBOL DE VALVULAS HASTA EL FONDO DEL POZO

SE DETERMINA LA TEMPERATURA MAXIMA QUE PUEDE SOPORTAR LA TR
ANTES DEL PUNTO DE CEDENCIA

```

SELECT CASE OP
CASE 1
Tys = 25000 / 200
GRADS = "F-25"
CASE 2
Tys = 40000 / 200
GRADS = "N-40"

```

```

CASE 3-
  Tys = 55000 / 200
  GRADS = "J-55"

```

```

CASE 4
  Tys = 80000 / 200
  GRADS = "W-80"

```

```

CASE ELSE
  Tys = 110000 / 200
  GRADS = "P-110"

```

```
END SELECT
```

```

FUNCION DE RAMEY PARA EL RADIO DEL POZO
ft = LOG(2 * sor(alpha * t * 24) / rh) * .29

```

```
SE ADICIONA AISLANTE TERMICO A LA TUBERIA DE PRODUCCION
```

```
A = 0
```

```
rins(A) = rte + drins(A) / 12
```

```
Espa(A) = (rci - rins(A)) * 12
```

```
IF Espa(A) <= 1 THEN
```

```
  IF A = 0 THEN
```

```
    PRINT TAB(5); STRING$(57, "***")
```

```
    PRINT
```

```
    PRINT " EL DISEÑO DEL SISTEMA VERTICAL (DIAMETROS) NO CUMPLE "
```

```
    PRINT " CON EL REQUERIMIENTO DE AL MENOS 1 Pg DE ESPACIO ANULAR "
```

```
    PRINT
```

```
    PRINT TAB(5); STRING$(57, "***")
```

```
    GOTO 6
```

```
  ELSE
```

```
    END IF
```

```
    PRINT TAB(5); STRING$(58, "***")
```

```
    PRINT
```

```
    PRINT " ESTE ES EL ESPESOR MAXIMO DE AISLANTE QUE PUEDE SOPORTAR "
```

```
    PRINT " EL DISEÑO DEL SISTEMA VERTICAL "
```

```
    PRINT " PERMITIENDO AL MENOS 1 Pg. DE ESPACIO ANULAR "
```

```
    PRINT
```

```
    PRINT TAB(5); STRING$(58, "***")
```

```
    GOTO 5
```

```
ELSE
```

```
END IF
```

```

PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LA VARIACION DE LA PRESION Y LA CALIDAD
DEL VAPOR CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DEL POZO INYECTOR

```

```
SE UTILIZA EL METODO DE MILNE PARA LA SOLUCION DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES
```

```
SE EVALUAN LOS VALORES DE P(z) y X(z) PARA LOS TRES PRIMEROS
```

```
INTERVALOS MEDIANTE EL METODO DE RUNGE KUTTA 4º ORDEN
```

```
Qm = (Q1 / (3.1416 * rte * 2)) / 3600
```

```
P(0) = P1
```

```
X(0) = X1(A)
```

```
Tv(0) = 115.1 * P(0) * .225
```

```
Tc(0) = Tc * .0115 * Z(0)
```

```
Vcs = X(0) / 100 * 363.9 * P(0) * -.9588 + (1 - X(0) / 100) * (.01587 + .00086 * P(0) * .225 + .0002 * P(0) * .45)
```

```
Zc(0) = Vcs
```

```
FOR B = 0 TO 3
```

```
  CALL CTRANSFER(A, B, Utc(), rte, Pins(), rci, rce, rh, Tv(), Tinc(), Tc(), Ie(), ft, Ke, Kins, Kcom, Kha, Etc, Ecl, Eins, a
```

```
  CALL CFRICCION(B, DnRe(), DRUG(), DFF(), Tv(), P(), X(), rti, Q1, FF)
```

```
  P = P(B)
```

```

X = X(B)
Z = Z(B)
Te = Te(B)
Vz = Vz(B)
U = Ute(B)
KP1 = deltax * DERP2(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
KX1 = deltax * DERXZ(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
P = P(B) + KP1 / 2
X = X(B) + KX1 / 2
Z = Z(B) + deltax / 2
KP2 = deltax * DERP2(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
KX2 = deltax * DERXZ(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
P = P(B) + KP2 / 2
X = X(B) + KX2 / 2
Z = Z(B) + deltax / 2
KP3 = deltax * DERP2(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
KX3 = deltax * DERXZ(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
P = P(B) + KP3
X = X(B) + KX3
Z = Z(B) + deltax
KP4 = deltax * DERP2(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
KX4 = deltax * DERXZ(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
P(B + 1) = P(B) + 1 / 6 * (KP1 + 2 * KP2 + 2 * KP3 + KP4)
X(B + 1) = X(B) + 1 / 6 * (KX1 + 2 * KX2 + 2 * KX3 + KX4)
Z(B + 1) = Z(B) + deltax
Tv(B + 1) = 315.1 * P(B + 1) ^ .225
Te(B + 1) = Te + .0115 * Z(B + 1)
Vz(B + 1) = Vz(B + 1) / 100 * 363.0 * P(B + 1) ^ -.9588 + (1 - X(B + 1) / 100) * (.01587 + .00086 * P(B + 1) ^ .225 + .0002
Tins(B + 1) = Tins(B)
Tci(B + 1) = Tci(B)

```

NEXT B

SE APLICA EL METODO DE MILNE PREDICOR-CORRECTOR PARA LOS INTERVALOS SIGUIENTES

FOR B = 1 TO MZ - 3

```

CALL CTRANSFER(A, B, Ute(), rte, eins(), rcl, rce, rh, Tv(), Tins(), Tci(), Te(), ft, Ke, Kins, Kcom, Kha, Ete, Ecl, Eim, n
CALL CFRICCION(B, Dnre(), DRug(), OFF(), Iv(), P(), X(), rti, Ol, FF)

```

```

P = P(B)
X = X(B)
Z = Z(B)
Te = Te(B)
Vz = Vz(B)
U = Ute(B)

```

```

FP(B) = DERP2(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
fx(B) = DERXZ(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
P = P(B + 1)
X = X(B + 1)
Z = Z(B + 1)
FP(B + 1) = DERP2(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
fx(B + 1) = DERXZ(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
P = P(B + 2)
X = X(B + 2)
Z = Z(B + 2)
FP(B + 2) = DERP2(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
fx(B + 2) = DERXZ(P, X, Z, Vz, rte, Ol, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)

```

* PREDICCION DE LOS VALORES DE P(i) y X(i)

```

PP(B + 3) = P(B - 1) + 4 / 3 * deltax * (2 * FP(B) - FP(B + 1) + 2 * FP(B + 2))
XP(B + 3) = X(B - 1) + 4 / 3 * deltax * (2 * fx(B) - fx(B + 1) + 2 * fx(B + 2))

```

```

P = PPEB + 3)
X = XP(B + 3)
Z = Z(B + 3)
FP(B + 3) = DERVPZ(P, X, Z, Vx, rre, Q1, Qm, Te, Ke, U, ft, Jc, G, FF)
fa(B + 3) = DERAZP(X, Z, Vx, rre, Q1, Qm, Te, Ke, U, ft, Jc, G, FF)
* CORRECCION DE LOS VALORES DE P(Z) Y X(Z)
PC(B + 3) = P(B + 1) + deltas / 3 * (FP(B + 1) + 4 * FP(U + 2) + FP(B + 3))
XC(B + 3) = X(B + 1) + deltas / 3 * (fa(B + 1) + 4 * fa(U + 2) + fa(B + 3))
* VALORES FINALES DE P(Z) Y X(Z)
P(B + 3) = PC(B + 3) + 9 / 121 * (PP(B + 3) - PC(B + 3))
X(B + 3) = XC(B + 3) + 9 / 121 * (XP(B + 3) - XC(B + 3))
Z(B + 3) = Z(B + 2) + deltas
Tv(B + 3) = 115.1 + P(B + 3) * .225
Tc(B + 3) = Ts + .0115 * Z(B + 3)
Vz(B + 3) = X(B + 3) / 100 + 365.9 * P(B + 3) * -.9588 + (1 - X(B + 3) / 100) * (.01587 + .00086 * P(B + 3) * .225 + .0002
NEXT B
FOR B = NZ - 2 TO NZ
CALL CTRANSFER(A, B, Ute(), rre, rins(), rci, rce, rh, Iv(), Tins(), Tc(), Te(), ft, Ke, Kins, Kcem, Khe, Ete, Ecl, Eins
NEXT B
IF A = 0 THEN
PRINT "          R E S U L T A D O S "
PRINT "          EN EL APAREJO VERTICAL DE INYECCION"
PRINT
PRINT "SISTEMA (LINEA SUP. Y IP) SIN AISLANTE TERMICO "
TRS = " " * " SIN AISLANTE TERMICO " * " "
PRINT TAB(1); STRINGS(74, "-")
PRINT "PROF. PRESION CALIDAD CALOR PERD. TEMP.VAPOR TEMP.IP TEMP.TR "
PRINT "(pies) (lb/pg^2) [%] [%] [%] [%] [%] "
PRINT TAB(1); STRINGS(74, "-")
ELSE
TRS = " " * " AUN CON AISLANTE TERMICO " * " "
PRINT
PRINT "SISTEMA (LINEA SUP. Y IP) CON"; drins(A); "Pg. DE AISLANTE TERMICO"
PRINT TAB(1); STRINGS(74, "-")
PRINT "PROF. PRESION CALIDAD CALOR PERD. TEMP.VAPOR TEMP.AISL. TEMP.TR "
PRINT "(pies) (lb/pg^2) [%] [%] [%] [%] [%] [%] "
PRINT TAB(1); STRINGS(74, "-")
END IF
FOR I = 1 TO NZ
Qc(i) = 2 * 3.1416 * rre * Ute(i) * (Tv(i) - Tc(i)) * Z(i)
Ql(i) = 91 * P(i) * -.2574 + 13.18 * X(i) / P(i) * .08774 - 91 * P(i) * .2574 - 13.18 * X(i) / P(i) * .08774 - Z(i) / Ja + Qm * 2
Qpc(i) = Qc(i) / Qwh(A) * 100
PRINT USING "###.### ###.### ##.## ###.### ###.### ###.### %"; Z(i); P(i); X(i); Qpc(i); Tv(i); Tin
NEXT I
IF Tc(NZ) > Tys THEN
PRINT TRS
PRINT " LA TR DE GRADO "; GRAD; " PODRIA NO RESISTIR LOS ESFUERZOS"
PRINT " TERMICOS GENERADOS POR EL INCREMENTO DE TEMPERATURA "
PRINT " * TEMP. MAX. PERMISIBLE, T = "; Tys; " [ F ] " *
ELSE
END IF
PORCENTAJE TOTAL DE CALOR PERDIDO EN EL SISTEMA VERTICAL
Qpcv(A) = Qpc(NZ)
CALOR EN EL FONDO DEL POZO
Qc(A) = Qwh(A) - Q(NZ)

```

3. PERDIDAS DE CALOR HACIA FORMACIONES ADYACENTES Y CANTIDAD DE ACEITE DESPLAZABLE EN LA FORMACION PRODUCTORA

SE UTILIZA LA SOLUCION DE RUBENSHEIN PARA LA CONDUCCION TRANSITORIA DEL CALOR EN LA FORMACION

FUNCION LOGARITMICA DEL TIEMPO ADIMENSIONAL PROPUESTA POR RAMEY

$lgt_d = \text{LOG}(4 * \alpha * t * 24 / h^2) / \text{LOG}(10)$
CALL RUBENSHEIN(lgt_d, Dlgd(), Dheat(), heat)

CALOR PERDIDO A LOS ESTRATOS ADYACENTES
 $Qad(A) = Qsf(A) * \text{heat} / 100$

PORCENTAJE TOTAL DE CALOR PERDIDO EN TODO EL SISTEMA
 $Qpct(A) = Qpcr(A) + Qpcv(A) + \text{heat}$

CALOR NETO EN LA FORMACION PRODUCTORA
 $Qnet(A) = Qsf(A) * (1 - \text{heat} / 100)$

CANTIDAD DE ACEITE DESPLAZABLE EN LA FORMACION USANDO LA ECUACION DE MARX-LANGENHEIM

$fx = 2 * Ke / (M * h * \alpha * .5) * (t * 24) * .5$
CALL ERFC(fx, Dfx(), Dfrcx(), erfc)

$Vo(A) = 4.273 * Qnet(A) * \text{por} / 100 * (Soi - Sor) / 100 / (M * (Tv(N2) - Te(N2))) * \text{erfc}$

A = A + 1

INPUT "CONTINUO S/H": OPS

IF OPS = "N" OR OPS = "Y" THEN GOTO 5

IF A < 10 THEN GOTO 2

CLS

PRINT : PRINT : PRINT

PRINT " R E S U L T A D O S "
PRINT " En LA FORMACION PRODUCTORA "

PRINT

PRINT " EN EL DIA NUM.: t; "DE INYECCION"

PRINT TAB(1); STRING\$(70, "-")

PRINT " AISLANTE CALOR PERD. CALOR TOTAL CALOR NETO EN ACEITE "

PRINT " ESTRATOS ADY. PERDIDO LA FORMACION DESPLAZABLE "

PRINT " [Pg] [Btu/hr] [X] [Btu/hr] [l/dia] "

PRINT TAB(1); STRING\$(70, "-")

FOR I = 0 TO A - 1

PRINT USING "#####.##" 00000000.00 00.00 000000.00 00000.000 00000.000; drlna(I); Qad(I); Qpct(I); Qnet(I); Vo(I)

NEXT I

END

SUB CFRICCION (R, DNRe(), DRug(), DFF(), Ivc(), P(), X(), rli, Qi, FF)
DIM X(500), Y(500), W(500), C(500), D(500), FFCAL(5)

SUBROUTINA PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE FRICCION

MEDIANTE INTERPOLACION DE VALORES LEIDOS DEL DIAGRAMA DE MOODY

PARA UN NUMERO DE REYNOLDS DE 1E+5 A 9E+7 Y UNA RUGOSIDAD DE LA

TUBERIA DE .0002 A .001 (DE Q A 1.8 Pg. DE DIAMETRO INTERIOR)

* SE CALCULA EL NUMERO DE REYNOLDS Y LA RUGOSIDAD DE LA TUBERIA PARA LAS
 * CONDICIONES DEL SISTEMA DE INYECCION CON LAS SIGUIENTES ECUACIONES

```
rhov = .0027-554278# * P(B) ^ .9588
muB = (82.2516 * .017815 * Tv(B) + .0000659 * Tv(B) ^ 2 - rhov * (31.45 - .05253 * Tv(B))) * .0001
muB = 2.185 / (.04012 * Tv(B) + .000005147# * Tv(B) ^ 2 - 1)
muB = X(B) / 100 * muB + (1 - X(B) / 100) * muM
```

```
NRe = 6.317 * Qf / (muB * dt1)
Rug = .0018 / dt1
```

* HACE LA PRIMERA INTERPOLACION

```
M = 4
I = 0
DO
  I = I + 1
  DIF = DMR(I) - NRe
  LOOP UNTIL DIF = 0
  IF I = 25 OR I = 27 THEN
    I = 25
  ELSEIF I = 1 THEN I = 2
END IF
F = I - 1
FOR K = 1 TO 5
  L = 0
  FOR J = F TO F + 3
    L = L + 1
    XX(L) = DMR(I)
    Y(L) = DFF(I, K)
  NEXT J
  CALL SPLINE(M, XX(), Y(), B(), C(), D())
  V = NRe
  FFCAL(K) = SEVAL(M, V, XX(), Y(), B(), C(), D())
NEXT K
```

realiza la 2da. Interpolacion

```
IF Rug < .0004 THEN
  F = 1
ELSE F = 2
END IF
L = 0
FOR I = F TO F + 3
  L = L + 1
  XX(L) = DRug(I)
  Y(L) = FFCAL(I)
NEXT I
CALL SPLINE(M, XX(), Y(), B(), C(), D())
V = Rug
FF = SEVAL(M, V, XX(), Y(), B(), C(), D())
```

END SUB

SUB CTRANSFER (A, B, Ute(), rte, rins(), rci, rca, rh, Tv(), Tins(), Tci(), Te(), ft, Ke, Kins, Kcom, Kha, Ete, Eci, Elns, sigma, Can, DIM Th(B), Us(B), hr(B), hc(B))

* SUBRUTINA QUE UTILIZA UN PROCESO ITERATIVO PARA DETERMINAR EL
 * COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL, Ute DESDE EL INTERIOR
 * DE LA TUBERIA DE PRODUCCION HASTA LA FORMACION

```
U = 2
DO
```

```

Us(B) = U
fact = Ke / (rte * Us(B))
Th(B) = (Tv(B) * ft + fact * Te(B)) / (ft + fact)
Tins(B) = Tv(B) - (Tv(B) - Th(B)) * Us(B) * rte / Kins * LOG(rins(A) / rte)
Tcl(B) = Th(B) + rte * Us(B) * LOG(rh / rce) / Kcm * (Tv(B) - Th(B))
IF A = 0 THEN
    fcl = (1 / Ete + rte / rcl * (1 / Ecl - 1)) ^ -1
    hr(B) = sigma * fcl * ((Tv(B) + 460) ^ 2 + (Tcl(B) + 460) ^ 2) * ((Tv(B) + 460) + (Tcl(B) + 460))
ELSE
    fcl = (1 / Eins + rlns(A) / rcl * (1 / Ecl - 1)) ^ -1
    hr(B) = sigma * fcl * ((Tins(B) + 460) ^ 2 + (Tcl(B) + 460) ^ 2) * ((Tins(B) + 460) + (Tcl(B) + 460))
END IF
beta = 1 / (Tcl(B) + 460)
Pr = Can * muen / Kha
Gr = (rcl - rte) * 3 * Grav * rhoan ^ 2 * beta * (Tv(B) - Tcl(B)) / muen ^ 2
khc = .049 * (Gr * Pr) ^ .333 * Pr ^ .074 * Kha
hc(B) = khc / (rte * LOG(rcl / rte))
FACTB = rte * LOG(rh / rce) / Kcm
IF A = 0 THEN
    U = (1 / (hc(B) + hr(B)) + FACTB) ^ -1
ELSE
    U = (rte * LOG(rins(A) / rte) / Kins + rte / (rins(A) * (hc(B) + hr(B))) + FACTB) ^ -1
END IF
difer = ABS(Us(B) - U)
LOOP UNTIL difer < .001
Ute(B) = U
END SUB

FUNCTION DERPZ (P, X, Z, Vz, rte, Qi, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
' FUNCION PARA EVALUAR LA ECUACION dp/dz
DEROZ = -2 * 3.1416 * rte * U / Qi * (115.1 * P ^ .225 - (Te * Ke + 115.1 * P ^ .225 * rte * U * ft) / (rte * U * ft + Ke))
DERHX = 13.18 * P ^ -.08774
DERVX = 3.639 * P ^ -.9588 - .0001587 * .00000086# * P ^ .225 - .000002 * P ^ .45
DERNP = (23.4234 * P ^ -.7426 - 1.1564 * X * P ^ -1.08774) / 144
DERVP = (-3.489732# * P ^ -1.9588 * X * (1 - X / 100) * (.000019 * P ^ -.775 + .00009 * P ^ -.55)) / 144
dl = 2 * rte * 12 * 2
A1 = DEROZ + DERHX / DERVX * (FF * Vz / dl - g / (Om ^ 2 * Vz)) + FF * Om ^ 2 * Vz ^ 2 / (Je * g * dl)
B1 = DERNP - Vz / Je - DERHX / DERVX * (g / Om ^ 2 + DERVP)
DERPZ = A1 / B1 / 144
END FUNCTION

FUNCTION DEARZ (P, X, Z, Vz, rte, Qi, Om, Te, Ke, U, ft, Je, g, FF)
' FUNCION PARA EVALUAR LA ECUACION dx/dz
DEROZ = -2 * 3.1416 * rte * U / Qi * (115.1 * P ^ .225 - (Te * Ke + 115.1 * P ^ .225 * rte * U * ft) / (rte * U * ft + Ke))
DERHX = 13.18 * P ^ -.08774
DERVX = 3.639 * P ^ -.9588 - .0001587 * .00000086# * P ^ .225 - .000002 * P ^ .45
DERNP = (23.4234 * P ^ -.7426 - 1.1564 * X * P ^ -1.08774) / 144
DERVP = (-3.489732# * P ^ -1.9588 * X * (1 - X / 100) * (.000019 * P ^ -.775 + .00009 * P ^ -.55)) / 144
dl = 2 * rte * 12 * 2
C = (Vz / Je - DERNP) / (DERNP + Om ^ 2 * Vz / (Je * g) * DERVP)
A1 = DEROZ * (1 + C) + (C * FF * Om ^ 2 * Vz ^ 2 / (g * dl)) / Je
B1 = DERHX * (1 + C) + C * Om ^ 2 * Vz * DERVX / (Je * g)
DEARZ = A1 / B1
END FUNCTION

SUB ENTALPIA (Pi, Dp(), Dh(), Dhg(), hf, hfg)
DIM XX(4), Y(4), B(4), C(4), D(4)
' SUBRUTINA PARA INTERPOLAR LOS VALORES DEL CAMBIO DE ENTALPIA (hfg)
' Y DEL AGUA (hf) A LA PRESTION DEL FLUIDO DE INYECCION. EN UN RANGO

```

```
DE 500 A 1500 lb/pg2
N = 4
```

```
I = 0
```

```
DO
```

```
  I = I + 1
```

```
  DIF = DP(I) - PI
```

```
  LOOP UNTIL DIF >= 0
```

```
  IF I = 35 OR I = 36 THEN
```

```
    I = 34
```

```
  ELSEIF I = 1 THEN I = 2
```

```
  END IF
```

```
  F = I - 1
```

```
  L = 0
```

```
  FOR I = F TO F + 3
```

```
    L = L + 1
```

```
    XX(L) = DP(I)
```

```
    Y(L) = Dhf(I)
```

```
  NEXT I
```

```
  CALL SPLINE(N, XX(), Y(), B(), C(), D())
```

```
  V = PI
```

```
  hf = SEVAL(N, V, XX(), Y(), B(), C(), D())
```

```
  L = 0
```

```
  FOR I = F TO F + 3
```

```
    L = L + 1
```

```
    XX(L) = DP(I)
```

```
    Y(L) = Dhfg(I)
```

```
  NEXT I
```

```
  CALL SPLINE(N, XX(), Y(), B(), C(), D())
```

```
  hfg = SEVAL(N, V, XX(), Y(), B(), C(), D())
```

```
END SUB
```

```
SUB ERTCK (fx, Dfx(), Dfrcx(), ertc)
DIM XX(27), Y(27), B(27), C(27), D(27)
```

```
* SUBROUTINA PARA INTERPOLAR EL VALOR DE LA FUNCION ERROR
* DEL MODELO DE MARY-LANGENHEIM
```

```
N = 4
```

```
I = 0
```

```
DO
```

```
  I = I + 1
```

```
  DIF = Dfx(I) - fx
```

```
  LOOP UNTIL DIF <= 0
```

```
  IF I = 26 OR I = 27 THEN
```

```
    I = 25
```

```
  ELSEIF I = 1 THEN I = 2
```

```
  END IF
```

```
  F = I - 1
```

```
  L = 0
```

```
  FOR I = F TO F + 3
```

```
    L = L + 1
```

```
    XX(L) = Dfx(I)
```

```
    Y(L) = Dfrcx(I)
```

```
  NEXT I
```

```
  CALL SPLINE(N, XX(), Y(), B(), C(), D())
```

```
  V = fx
```

```
  ertc = SEVAL(N, V, XX(), Y(), B(), C(), D())
```

```
END SUB
```

```
SUB RUBENSHEIM (IgtD, DigtD(), Dheat(), heat)
DIM XX(13), Y(13), B(13), C(13), D(13)
```

```
* SUBROUTINA PARA INTERPOLAR EL VALOR DE LA FUNCION LOGARITMICA DEL
* TIEMPO ADIMENSIONAL EN EL MODELO DE RUBENSHEIM PARA OBTENER EL
* PORCENTAJE DE CALOR PERDIDO EN LA FORMACION
```

```
M = 4
I = 0
DO
  I = I + 1
  DIF = ABS(DigtD(I) - IgtD)
  LOOP UNTIL DIF <= .5
  IF I = 12 OR I = 13 THEN
    I = 11
  ELSEIF I = 1 THEN I = 2
END IF
F = I - 1
L = 0
FOR I = F TO F + 3
  L = L + 1
  XX(L) = DigtD(I)
  Y(L) = Dheat(I)
NEXT I
CALL SPLINE(M, XX(), Y(), B(), C(), D())
V = IgtD
heat = SEVAL(M, V, XX(), Y(), B(), C(), D())
```

```
END SUB
```

```
FUNCTION SEVAL (M, V, XX(), Y(), B(), C(), D())
```

```
* FUNCION PARA INTERPOLAR UN VALOR PARTICULAR APARTIR DE LOS COEFICIENTES
* DEL POLINOMIO CUBICO GENERADO POR SPLINES
```

```
I = 1
IF I >= M THEN I = 1
IF V < XX(I) GOTO 100
IF V <= XX(I + 1) GOTO 300
100 I = 1
L = M + 1
200 K = (I + L) / 2
IF V < XX(K) THEN L = K
IF V >= XX(K) THEN I = K
IF L > I + 1 GOTO 200
300 DX = V - XX(I)
SEVAL = Y(I) + B(I) * DX + C(I) * DX ^ 2 + D(I) * DX ^ 3
```

```
END FUNCTION
```

```
SUB SPLINE (M, XX(), Y(), B(), C(), D())
```

```
* SUBROUTINA PARA DETERMINAR LOS COEFICIENTES DE UN POLINOMIO
* CUBICO GENERADO A PARTIR DE UNA SERIE DE PAREJAS DE DATOS
```

```
NM1 = M - 1
IF M < 2 GOTO 51
IF M = 3 GOTO 50
D(1) = XX(2) - XX(1)
C(2) = (Y(2) - Y(1)) / D(1)
FOR I = 2 TO NM1
  D(I) = XX(I + 1) - XX(I)
  B(I) = 2 * (D(I) - 1) + D(I)**2
  C(I + 1) = (Y(I + 1) - Y(I)) / D(I)
```

```

C(I) = D(I + 1) * C(I)
NEXT I

B(I) = -D(I)
B(N) = -D(N - 1)
C(I) = 0
C(N) = 0
IF N = 3 GOTO 15
C(I) = C(I) / (XX(4) - XX(2)) - C(I) / (XX(3) - XX(1))
C(N) = C(N - 1) / (XX(N) - XX(N - 2)) - C(N - 2) / (XX(N - 1) - XX(N - 3))
C(I) = C(I) * D(I) - 2 / (XX(4) - XX(1))
C(N) = -C(N) * D(N - 1) - 2 / (XX(N) - XX(N - 3))
15  REM CONTINUE

FOR I = 2 TO N
  t = D(I - 1) / B(I - 1)
  B(I) = B(I) - t * D(I - 1)
  C(I) = C(I) - t * C(I - 1)
NEXT I

C(N) = C(N) / B(N)

FOR IB = 1 TO MM1
  I = N - IB
  C(I) = (C(I) - D(I) * C(I + 1)) / B(I)
NEXT IB

B(N) = (Y(N) - Y(MM1)) / D(MM1) + D(MM1) * C(MM1) + 2 * C(N)

FOR I = 1 TO MM1
  B(I) = (Y(I + 1) - Y(I)) / D(I) - D(I) * C(I + 1) + 2 * C(I)
  D(I) = (C(I + 1) - C(I)) / D(I)
  C(I) = 3 * D(I)
NEXT I

C(N) = 3 * C(N)
D(N) = D(N - 1)
GOTO 51
50  B(I) = (Y(2) - Y(1)) / (XX(2) - XX(1))
    C(I) = 0
    D(I) = 0
51  REM CONTINUE
END SUB

```

CAPITULO V
EJEMPLO DE APLICACION

Considerese un pozo en proceso de inyección continua de vapor con un gasto de inyección de 800 bl/día, en una formación de 60 pies de espesor con una porosidad de 25%. La saturación del aceite cuando se inicia el proceso es de 70%, y de 15% después del barrido. La calidad del vapor a la salida del generador es de 81.3% a una presión de 690 lb/pg² Abs. (500 °F). La temperatura ambiente es de 80 °F. La longitud de las líneas superficiales es de 800 pies y la profundidad del pozo de 1000 pies. El sistema es con líneas de superficiales aéreas.

Calcular:

- Las pérdidas de calor en líneas superficiales
- La calidad del vapor en la cabeza del pozo
- La variación de la presión y calidad del vapor con la profundidad del pozo.
- La temperatura máxima permisible en la TR.
- Las pérdidas de calor en el aparejo vertical de inyección.
- La cantidad de calor que entra a la formación
- El gasto de aceite desplazado por el vapor en la formación para un tiempo de inyección de 50 y 100 días.

datos adicionales:

Tubería superficial	Diám. Ext. 3.5 Pg (Int. 3)
Tubería de producción (TP)	Diám. Ext. 3 3/8 Pg (Int. 2 7/8)
Tubería de revestimiento (TR)	Diám. Ext. 7 5/8 Pg (Int. 7 1/8), J-55
Espesores de aislante térmico	1/8, 3/16, 1/4, 3/8, 1/2, 3/4, 1, 1.5 y 2 Pg
Pozo	9 Pg
Conductividad térmica tubería	25 Btu/hr-pie-°F

Conductividad térmica aislante	0.0256 Btu/hr-pie-°F
Conductividad térmica formación	0.3708 Btu/hr-pie-°F
Conductividad térmica aire	0.0156 Btu/hr-pie-°F
Conductividad térmica fluido en el espacio anular	0.0255 Btu/hr-pie-°F
Conductividad térmica cemento	0.2 Btu/hr-pie-°F
Emisividad térmica TP ext.	0.9
Emisividad térmica TR int.	0.9
Emisividad térmica Aislante	0.4
Calor específico del agua	1 Btu/lb _m -°F
Calor específico del fluido en el espacio anular	0.242 Btu/lb _m -°F
Viscosidad del aire	0.0464 lb _m /pie-hr
Viscosidad del fluido en el espacio anular	0.0464 lb _m /pie-hr
Difusividad térmica de la tierra	0.0286 pie ² /hr
Velocidad del aire	5 millas/hr
Densidad del fluido en el espacio anular	0.0388 lb _m /pie ³
Capacidad calorífica de la Tierra	35 Btu/pie ³ -°F

CORRIDA NO. 1

PRESION INY.	690 PSIA	SAT. ACEITE	70 %	DIAM. TP	3.375 PG
CALIDAD INY.	81.3 %	H	60 PIE	DIAM. TR	7.625 PG
GASTO INY.	11666 LB/HR	POR.	25 %	DIAM. POZO	9.000 PG
TIEMPO INY.	100 DIAS	K AISL.	.026 LB/HR-P-F	E.TUB	0.900

R E S U L T A D O S
EN EL SISTEMA SUPERFICIAL DE INYECCION

GENERADOR DE VAPOR:

CALOR TOTAL GENERADO

$$Q = 1.246317E+07 \text{ (Btu/hr)}$$

TUBERIAS AERÉAS:

ESPESOR AISLANTE	TEMP. EXT. TUBERIA	CALOR PERDIDO	CALOR EN LA CABEZA POZO	CALIDAD VAPOR CABEZA POZO
[Pg]	[F]	[%]	[Btu/hr]	[%]
0.000	500.98	15.89	10482419.00	57.448
0.125	232.40	4.02	11962339.00	75.259
0.188	196.31	3.09	12077971.00	76.662
0.250	173.98	2.53	12147985.00	77.505
0.375	147.76	1.88	12228972.00	78.480
0.500	132.84	1.51	12274580.00	79.029
0.750	116.51	1.11	12324384.00	79.629
1.000	107.78	0.90	12351159.00	79.951
1.500	98.67	0.67	12379490.00	80.292
2.000	93.99	0.55	12394413.00	80.472

PARA EL CASO DE TUBERIAS ENTERRADAS:

CALOR TOTAL PERDIDO

$$Q = 476403.6 \text{ (Btu / hr)}$$

CALIDAD EN LA CABEZA DEL POZO

$$X = 75.5633 \text{ (%)}$$

SISTEMA (LINEA SUP. y TP) CON .25 Pg. DE AISLANTE TERMICO

PROF. (pies)	PRESION (lb/pg ²)	CALIDAD [%]	CALOR PERD. [%]	TEMP.VAPOR [F]	TEMP.AISL. [F]	TEMP.TR [F]
100	688.799	77.293	0.20	500.779	343.894	206.953
200	687.596	77.082	0.40	500.582	344.131	207.756
300	686.392	76.871	0.59	500.385	344.367	208.559
400	685.189	76.284	0.79	500.187	344.604	209.360
500	683.983	76.194	0.98	499.989	344.840	210.162
600	682.778	75.722	1.18	499.791	345.077	210.962
700	681.556	75.740	1.37	499.589	345.313	211.762
800	680.353	75.337	1.56	499.391	345.551	212.562
900	679.120	75.440	1.75	499.187	345.787	213.360
1000	677.922	75.086	1.94	498.989	346.026	214.159

SISTEMA (LINEA SUP. y TP) CON .375 Pg. DE AISLANTE TERMICO

PROF. (pies)	PRESION (lb/pg ²)	CALIDAD [%]	CALOR PERD. [%]	TEMP.VAPOR [F]	TEMP.AISL. [F]	TEMP.TR [F]
100	688.815	78.300	0.16	500.782	307.391	187.912
200	687.630	78.122	0.32	500.588	307.726	188.770
300	686.443	77.943	0.48	500.393	308.062	189.627
400	685.256	77.320	0.63	500.198	308.399	190.484
500	684.069	77.262	0.79	500.003	308.735	191.340
600	682.881	76.759	0.95	499.808	309.073	192.196
700	681.677	76.810	1.10	499.609	309.409	193.051
800	680.492	76.375	1.25	499.414	309.747	193.906
900	679.276	76.510	1.41	499.213	310.084	194.759
1000	678.098	76.125	1.56	499.018	310.423	195.614

SISTEMA (LINEA SUP. y TP) CON .5 Pg. DE AISLANTE TERMICO

PROF. (pies)	PRESION (lb/pg ²)	CALIDAD [%]	CALOR PERD. [%]	TEMP.VAPOR [F]	TEMP.AISL. [F]	TEMP.TR [F]
100	688.824	78.871	0.14	500.783	280.820	175.049
200	687.648	78.714	0.27	500.591	281.230	175.941
300	686.471	78.557	0.40	500.398	281.641	176.833
400	685.294	77.910	0.54	500.204	282.053	177.725
500	684.117	77.874	0.67	501.011	282.465	178.617
600	682.939	77.350	0.80	499.817	282.878	179.508
700	681.744	77.422	0.93	499.620	283.290	180.398
800	680.570	76.966	1.07	499.427	283.704	181.288
900	679.363	77.123	1.20	499.227	284.116	182.177
1000	678.196	76.717	1.32	499.034	284.532	183.067

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

SISTEMA (LINEA SUP. y TP) CON .75 Pg. DE AISLANTE TERMICO

PROF. (pies)	PRESION (lb/pg ²)	CALIDAD [%]	CALOR PERD. [%]	TEMP. VAPOR [F]	TEMP. AISL. [F]	TEMP. TR [F]
100	688.834	79.499	0.11	500.785	244.032	158.499
200	687.668	79.370	0.21	500.594	244.553	159.435
300	686.502	79.241	0.32	500.403	245.075	160.370
400	685.334	78.562	0.42	500.211	245.598	161.305
500	684.169	78.553	0.53	500.020	246.121	162.240
600	683.001	78.003	0.63	499.028	246.645	163.174
700	681.818	78.103	0.74	499.632	247.168	164.107
800	680.655	77.619	0.84	499.441	247.694	165.041
900	679.458	77.804	0.94	499.243	248.218	165.974
1000	678.303	77.371	1.05	499.052	248.745	166.907

ESTE ES EL ESPESOR MAXIMO DE AISLANTE QUE PUEDE SOPORTAR
EL DISEÑO DEL SISTEMA VERTICAL
PERMITIENDO AL MENOS 1 Pg. DE ESPACIO ANULAR

R E S U L T A D O S EN LA FORMACION PRODUCTORA

EN EL DIA MUN. 100 DE INYECCION

AISLANTE (Pg)	CALOR PERD. ESTRATOS ADY. (Btu/hr)	CALOR TOTAL PERDIDO [%]	CALOR NETO EN LA FORMACION (Btu/hr)	ACEITE DESPLAZABLE (bl/día)
0.000	960585.25	36.25	8457175.00	262.321
0.125	1187362.50	16.90	10453764.00	323.686
0.188	1204365.63	15.53	10603463.00	328.287
0.250	1215051.75	14.67	10697545.00	331.179
0.375	1227882.88	13.64	10810513.00	334.652
0.500	1235393.00	13.04	10876634.00	336.686
0.750	1243910.25	12.36	10951622.00	338.992

CORRIDA NO. 2

PRESION INY.	690 PSIA	SAT. ACEITE	70 %	DIAM. TP	3.375 PG
CALIDAD INY.	81.3 %	H	60 PIE	DIAM. TR	7.625 PG
GASTO INY.	11666 LB/HR	POR.	25 %	DIAM. POZO	9.000 PG
TIEMPO INY.	50 DIAS	K AISL.	.026 LB/HR-P-F	E.TUB	0.900

R E S U L T A D O S
EN EL SISTEMA SUPERFICIAL DE INYECCION

GENERADOR DE VAPOR:

CALOR TOTAL GENERADO

$$Q = 1.246317E+07 \text{ (Btu/hr)}$$

TUBERIAS AEREAS:

ESPESOR AISLANTE	TEMP. EXT. TUBERIA	CALOR PERDIDO	CALOR EN LA CABEZA POZO	CALIDAD VAPOR CABEZA POZO
[Pg]	[F]	[X]	[Btu/hr]	[%]
0.000	500.98	15.89	10482419.00	57.448
0.125	232.40	4.02	11962339.00	75.269
0.188	196.31	3.09	12077971.00	76.662
0.250	173.98	2.53	12147985.00	77.505
0.375	147.76	1.88	12228972.00	78.480
0.500	132.84	1.51	12274580.00	79.029
0.750	116.51	1.11	12324384.00	79.629
1.000	107.78	0.90	12351159.00	79.951
1.500	98.67	0.67	12379490.00	80.292
2.000	93.99	0.55	12394413.00	80.472

PARA EL CASO DE TUBERIAS ENTERRADAS:

CALOR TOTAL PERDIDO

$$Q = 516721.6 \text{ [Btu / hr]}$$

CALIDAD EN LA CABEZA DEL POZO

$$X = 75.07782 \text{ [X]}$$

R E S U L T A D O S
EN EL APAREJO VERTICAL DE INYECCION

SISTEMA (LINEA SUP. y TP) SIN AISLANTE TERMICO

PROF. (pies)	PRESION (lb/pg ²)	CALIDAD [%]	CALOR PERD. [%]	TEMP.VAPOR (F)	TEMP.TP (F)	TEMP.TR (F)
100	688.354	56.889	1.04	500.706	500.706	381.306
200	686.696	56.331	2.08	500.435	500.435	381.410
300	685.025	55.775	3.10	500.160	500.160	381.512
400	683.379	55.523	4.12	499.890	499.890	381.619
500	681.684	55.097	5.14	499.610	499.610	381.716
600	680.010	54.916	6.14	499.334	499.334	381.817
700	678.309	54.605	7.14	499.053	499.053	381.914
800	676.619	54.499	8.13	498.773	498.773	382.011
900	674.916	54.277	9.11	498.490	498.490	382.106
1000	673.215	54.222	10.08	498.207	498.207	382.202

* SIN AISLANTE TERMICO *
LA TR DE GRADO J-55 PODRIA NO RESISTIR LOS ESFUERZOS
TERMICOS GENERADOS POR EL INCREMENTO DE TEMPERATURA
TEMP. MAX. PERMISIBLE, T = 275 (WF) *

SISTEMA (LINEA SUP. y TP) COM .125 Pg. DE AISLANTE TERMICO

PROF. (pies)	PRESION (lb/pg ²)	CALIDAD [%]	CALOR PERD. [%]	TEMP.VAPOR (F)	TEMP.AISL. (F)	TEMP.TR (F)
100	688.760	74.996	0.27	500.773	396.460	229.912
200	687.517	74.724	0.54	500.569	396.551	230.642
300	686.272	74.452	0.81	500.365	396.641	231.372
400	685.030	73.895	1.08	500.161	396.732	232.102
500	683.781	73.754	1.35	499.956	396.822	232.830
600	682.534	73.312	1.62	499.751	396.913	233.558
700	681.269	73.286	1.88	499.542	397.001	234.284
800	680.023	72.916	2.14	499.336	397.092	235.012
900	678.747	72.979	2.40	499.125	397.180	235.736
1000	677.505	72.660	2.66	498.920	397.271	236.462

SISTEMA (LINEA SUP. y TP) COM .1875 Pg. DE AISLANTE TERMICO

PROF. (pies)	PRESION (lb/pg ²)	CALIDAD [%]	CALOR PERD. [%]	TEMP.VAPOR (F)	TEMP.AISL. (F)	TEMP.TR (F)
100	688.784	76.422	0.23	500.777	365.257	212.230
200	687.567	76.182	0.45	500.577	365.433	213.017
300	686.347	75.943	0.68	500.377	365.608	213.804
400	685.130	75.350	0.90	500.178	365.784	214.590
500	683.908	75.242	1.13	499.977	365.960	215.376
600	682.687	74.769	1.35	499.776	366.136	216.161
700	681.448	74.776	1.57	499.571	366.311	216.944
800	680.228	74.374	1.79	499.370	366.488	217.729
900	678.978	74.469	2.00	499.163	366.662	218.510
1000	677.764	74.119	2.22	498.963	366.840	219.294

SISTEMA (LINEA SUP. Y TP) CON .25 Pg. DE AISLANTE TERMICO

PROF. [pies]	PRESION [lb/pg ²]	CALIDAD [%]	CALOR PERD. [%]	TEMP.VAPOR [F]	TEMP.AISL. [F]	TEMP.TR [F]
100	688.799	77.289	0.20	500.779	340.857	199.119
200	687.596	77.074	0.39	500.582	341.097	199.946
300	686.392	76.859	0.59	500.385	341.337	200.773
400	685.189	76.238	0.78	500.187	341.578	201.600
500	683.983	76.154	0.98	499.989	341.819	202.426
600	682.777	75.658	1.17	499.791	342.060	203.252
700	681.554	75.689	1.36	499.589	342.300	204.076
800	680.350	75.264	1.55	499.390	342.542	204.901
900	679.115	75.383	1.74	499.186	342.782	205.724
1000	677.918	75.010	1.93	498.988	343.025	206.548

SISTEMA (LINEA SUP. Y TP) CON .375 Pg. DE AISLANTE TERMICO

PROF. [pies]	PRESION [lb/pg ²]	CALIDAD [%]	CALOR PERD. [%]	TEMP.VAPOR [F]	TEMP.AISL. [F]	TEMP.TR [F]
100	688.815	78.297	0.16	500.782	304.213	180.975
200	687.629	78.116	0.32	500.588	304.553	181.854
300	686.443	77.934	0.47	500.393	304.892	182.733
400	685.256	77.276	0.63	500.198	305.233	183.611
500	684.069	77.226	0.79	500.003	305.574	184.489
600	682.881	76.697	0.94	499.808	305.915	185.366
700	681.675	76.762	1.09	499.609	306.255	186.243
800	680.490	76.304	1.25	499.413	306.598	187.119
900	679.272	76.456	1.40	499.212	306.938	187.994
1000	678.094	76.051	1.55	499.017	307.282	188.871

SISTEMA (LINEA SUP. Y TP) CON .5 Pg. DE AISLANTE TERMICO

PROF. [pies]	PRESION [lb/pg ²]	CALIDAD [%]	CALOR PERD. [%]	TEMP.VAPOR [F]	TEMP.AISL. [F]	TEMP.TR [F]
100	688.824	78.869	0.14	500.783	277.620	168.785
200	687.648	78.710	0.27	500.591	278.035	169.696
300	686.471	78.551	0.40	500.398	278.450	170.608
400	685.293	77.867	0.54	500.204	278.865	171.519
500	684.117	77.839	0.67	500.011	279.281	172.429
600	682.938	77.289	0.80	499.817	279.698	173.339
700	681.742	77.376	0.93	499.620	280.114	174.249
800	680.568	76.896	1.06	499.426	280.532	175.159
900	679.359	77.071	1.19	499.227	280.949	176.066
1000	678.193	76.644	1.32	499.034	281.369	176.976

SISTEMA (LINEA SUP. Y TP) CON .75 Pg. DE AISLANTE TERMICO

PROF. [p'ies]	PRESION [lt/pg ²]	CALIDAD [%]	CALOR PERD. [%]	TEMP.VAPOR [F]	TEMP.AISL. [F]	TEMP.TR [F]
100	688.834	79.498	0.11	500.785	240.886	153.176
200	687.668	79.367	0.21	500.594	241.412	154.128
300	686.502	79.256	0.32	500.403	241.939	155.079
400	685.334	78.521	0.42	500.211	242.466	156.030
500	684.169	78.521	0.53	500.020	242.993	156.980
600	683.001	77.943	0.63	499.827	243.522	157.931
700	681.816	78.059	0.74	499.632	244.050	158.880
800	680.653	77.551	0.84	499.440	244.580	159.830
900	679.454	77.754	0.94	499.242	245.109	160.779
1000	678.300	77.299	1.04	499.051	245.640	161.728

.....
 ESTE ES EL ESPESOR MAXIMO DE AISLANTE QUE PUEDE SOPORTAR
 EL DISEÑO DEL SISTEMA VERTICAL
 PERMITIENDO AL MENOS 1 Pg. DE ESPACIO ANULAR

R E S U L T A D O S
 EN LA FORMACION PRODUCTORA

EN EL DIA NUM. 50 DE INYECCION

AISLANTE [Pg]	CALOR PERD. ESTRATOS ADY. [Btu/hr]	CALOR TOTAL PERDIDO [%]	CALOR NETO EN LA FORMACION [Btu/hr]	ACEITE DESPLAZABLE [Bl/dAa]
0.000	739648.69	33.82	8685653.00	291.450
0.125	913744.94	14.53	10730055.00	359.421
0.188	926771.00	13.16	10883020.00	364.506
0.250	934956.00	12.30	10979136.00	367.703
0.375	944785.31	11.28	11094561.00	371.542
0.500	950540.44	10.68	11162143.00	373.790
0.750	957070.44	10.00	11238825.00	376.342

PERDIDA DE CALOR Y DE LA CALIDAD DEL VAPOR EN EL SISTEMA SUPERFICIAL

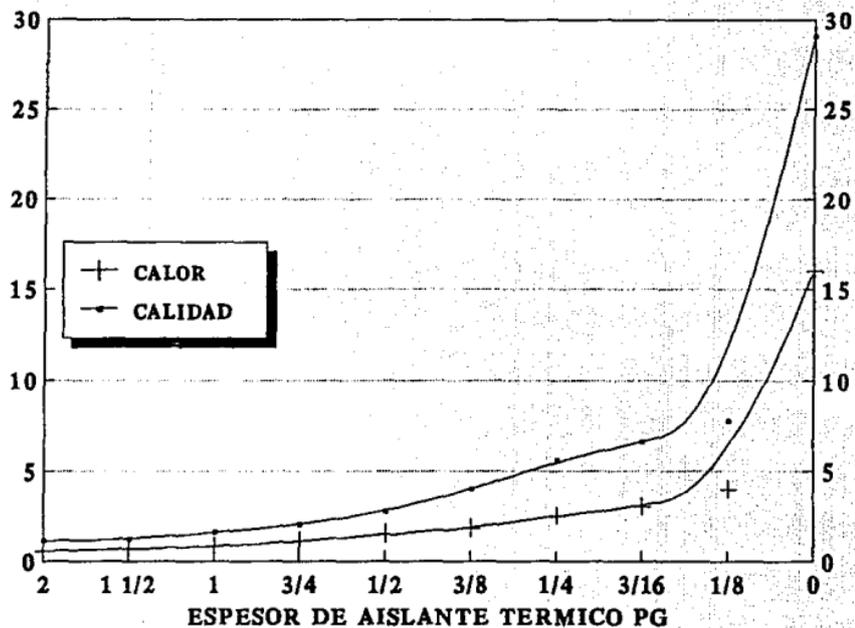


FIG. 5.1

**PORCENTAJE DE CALOR PERDIDO EN EL
APAREJO DE INYECCION**

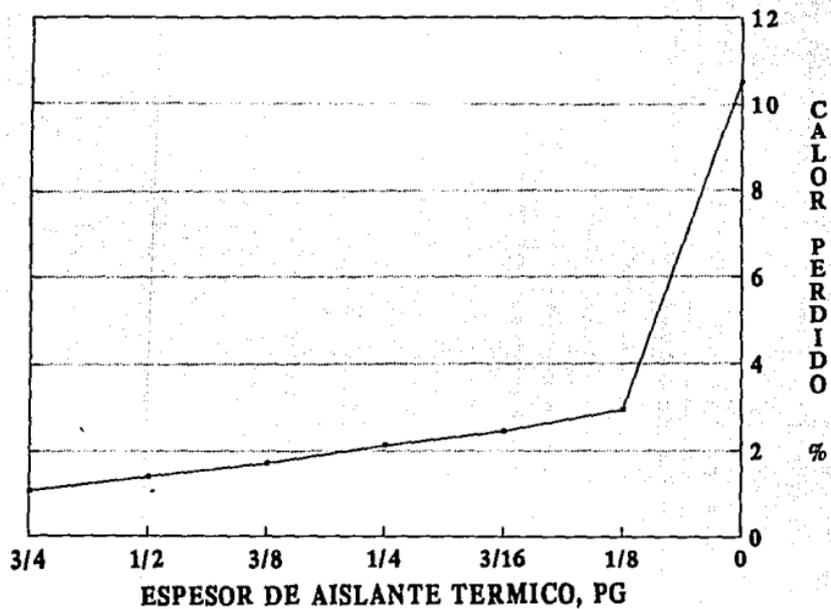


FIG 5.2

DESPLAZAMIENTO DE ACEITE EN LA FORMACION
PARA EL DIA 100 DE INYECCION

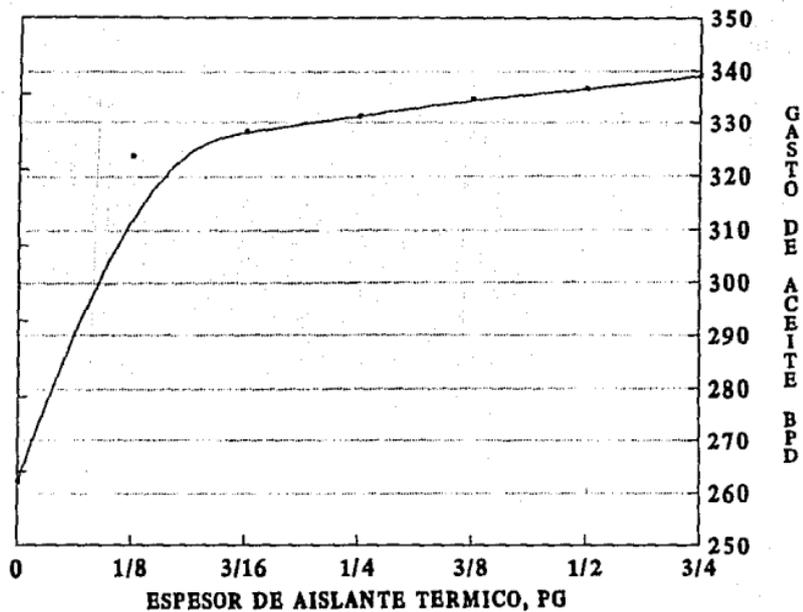


FIG 5.3

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

1. Unas cuantas décimas de pulgadas de aislante térmico en las tuberías de inyección, reduce hasta más del 25 % las pérdidas de calor. El ahorro diario que esto representa es alrededor de 10 a 14 barriles de combustible líquido*, dependiendo del diámetro de la tubería, tipo y espesor de aislante, niveles de temperatura y condiciones de operación.

2. Al incrementar el espesor del aislante térmico, se reducen las pérdidas de calor. Sin embargo, esa reducción ocurre en forma exponencial: ésto quiere decir, que las pérdidas de calor no van a ser notablemente disminuidas, aún con un gran incremento de espesor de aislante térmico. Así pues, se puede obtener un espesor óptimo.

3. Es importante que la inyección de vapor se realice a altos gastos: para mantener una buena calidad del vapor en el fondo del pozo. Pero, también es importante que la presión del fluido de inyección sea la adecuada (en la cual el fluido contenga la mayor cantidad de calor latente de vaporización). Estas variables, gasto y presión, pueden combinarse para encontrar la relación óptima: eligiendo el diámetro de la tubería del sistema de inyección.

4. El coeficiente total de transferencia de calor U_c , prácticamente permanece constante para todo el sistema vertical de inyección, sin embargo, existen otros parámetros (como la temperatura) que si se ven influenciados por la profundidad del pozo y deberán de tomarse en cuenta para estimar las pérdidas de calor.

* Para los datos del ejemplo, tomando en cuenta que un barril de combustible líquido produce 13-14 Bls. de vapor con 80 % de calidad a una presión de 680-700 psia. ⁽¹¹⁾

5. Es recomendable que la inyección de vapor se realice por la TP y, además, ésta debe estar aislada para evitar fallas mecánicas en la TR debido a los esfuerzos de origen térmico. En este sentido la temperatura en la TR se reduce hasta en un 35 %, con tan sólo 1/8 de pulgada de aislante térmico (para datos del ejemplo).

6. El programa de cómputo que aquí se presenta, ayuda a visualizar en forma muy clara el comportamiento del proceso de inyección de vapor, y permite elegir agilmente el diseño del sistema de inyección.

APENDICE A

PROPIEDADES FISICAS

Temperatura de saturación del agua:

$$T_s = 115.1P^{.225} \quad (\text{A.1})$$

T °F

P lb/Pg²

Viscosidad del agua:

$$\mu = \frac{2.185}{.040127 + .0000051547T^2 - 1} \quad (\text{A.2})$$

μ cp

T °F (T > 200 °F)

Calor latente de vaporización del agua:

$$L = 1318P^{-.08774} \quad (\text{A.3})$$

$$L = 898.2e^{-3.224 \cdot 10^{-4}P} \quad (\text{A.4})$$

L Btu/lb

P lb/Pg²

Entalpía del agua:

$$h = 91P^{.2574} \quad (\text{A.5})$$

Calidad del vapor:

$$X = \frac{(H_g - H_f)}{H_{fg}} \quad (\text{A.6})$$

X %

H Btu/lb_m

Volúmen específico del vapor:

para todas las presiones

$$V = \frac{X}{100} V_g + \left(1 - \frac{X}{100}\right) V_w \quad (\text{A.7})$$

para presiones bajas

$$V = \frac{X}{100} V_g \quad (\text{A.8})$$

V Pic³/lb

X %

Factor de volúmen del vapor:

$$B_g = .00504 \frac{ZT}{P} \quad (\text{A.9})$$

B_g bl/Pic³

T °R

$$P \text{ lb/Pg}^2$$

Compresibilidad del vapor:

$$C_z = \frac{1}{P} \quad (\text{A.10})$$

$$C_z \text{ volúmen/volúmen-lb/Pg}^2$$

Viscosidad y densidad del vapor:

$$\mu = [88.02 + .3227T + 2.135 \times 10^{-4}T^2 - \rho(1858 - 5.90T)] \frac{1}{10^4} \quad (\text{A.11})$$

$$\rho = 4.40189 \times 10^{-5} p^{.5583} \quad (\text{A.12})$$

$$\mu \text{ cp}$$

$$T \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho \text{ gr/cm}^3$$

$$P \text{ lb/Pg}^2$$

Entalpía del vapor saturado:

$$H_g = H_f + H_{fg} \quad \text{para 100 \% vapor} \quad (\text{A.13})$$

$$H_g = H_f + \frac{X}{100} H_{fg} \quad \text{para vapor húmedo} \quad (\text{A.14})$$

Conductividad térmica del vapor:

$$K = 10^{-4} (176 + .587T + 1.04 \times 10^{-3}T^2 - 4.51 \times 10^{-2}T^3) \quad (\text{A.15})$$

K Btu/hr-pie-°F

T °F

Conductividad térmica del aceite:

$$K = .0677(1 - .0003(T - 32)) / \rho_r$$

(A.16)

K Btu/hr-pie-°F

T °F

ρ_r , densidad relativa del aceite.

Conductividad térmica del gas:

$$K = \mu(C_p + 2.48/M)$$

(A.17)

K Btu/hr-pie-°F

M Peso molecular

μ cp

C_p Btu/lb-°F

Capacidad calorífica de las rocas:

$$M = (1 - \phi)(\rho C)_m + \phi \left[\frac{S_o(\rho C)_o}{B_o} + \frac{S_g(\rho C)_g}{B_g 5.61} + \frac{S_w(\rho C)_w}{B_w} \right]$$

(A.18)

M Btu/pie³-°F

ρ lb/pie³ @ C.S., $\rho_m = 165$ para la mayoría de las rocas

C Btu/lb-m-°F (Fig A.49)

Conductividad térmica para areniscas consolidadas:

$$K = .340\rho - 3.2\phi + .530k^{-10} + .013F - .031$$

(A.19)

K Btu/hr-pie-°F

ρ densidad del grano, gr/cm³

ϕ porosidad, fracc.

k permeabilidad, md

F factor de resistividad de la formación

Material	Temperatura ° F	Capacidad Calorífica Btu/lb _m -°F	Difusividad Térmica pie ² /hr
Aislante Si	100	0.205	0.012
Asbesto	800	0.25	0.01
Concreto	68	0.21	0.0187-0.0270

TABLA A.1 PROPIEDADES TERMICAS DE ALGUNOS MATERIALES NO METALES

Metal	Temperatura °F	Emisividad
Aluminio		
No pulfido	400 a 1,100	0.11 a 0.19
Pulfido	400 a 1,100	0.04 a 0.08
Acero		
Pulfido	350 a 1,200	0.05 a 0.30
No pulfido	400 a 1,100	0.75 a 0.95
Inoxidable	75 a 210	0.07 a 0.30

TABLA A.2. EMISIVIDADES APROXIMADAS DE ALGUNOS METALES

Material	Conductividad Térmica Btu/hr-pie-°F
Acero	25.0
Aislante (silicato)	0.02 a 0.06
Cemento	
Húmedo	0.5 a 0.6
Seco	0.2 a 0.4

TABLA A.4. CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ALGUNOS MATERIALES DEL POZO

° API	DENSIDAD RELATIVA	Lb/gal
10	1	8.328
15	0.965	8.044
20	0.934	7.778
25	0.904	7.529
30	0.876	7.296
35	0.849	7.076
40	0.825	6.870
45	0.802	6.675
50	0.779	6.490
55	0.758	6.316
60	0.740	6.167

TABLA A.5 DENSIDAD DEL ACEITE

MUESTRA	14.7 lb/pg ²			500 lb/pg ²		1500 lb/pg ²	
	seco	agua	gas	agua	gas	agua	gas
areniscas	34	34	34	34.1	34.1	34.9	34.3
lutitas	39.6	39.6	39.6	39.6	39.6	40	39.7
arcillas	35.4	35.4	35.4	35.5	35.5	36.2	35.7

TABLA A.3 CAPACIDADES CALORIFICAS DE ROCAS SATURADAS

VARIACION DEL CALOR SENSIBLE, LATENTE Y TOTAL DEL VAPOR CON LA PRESION

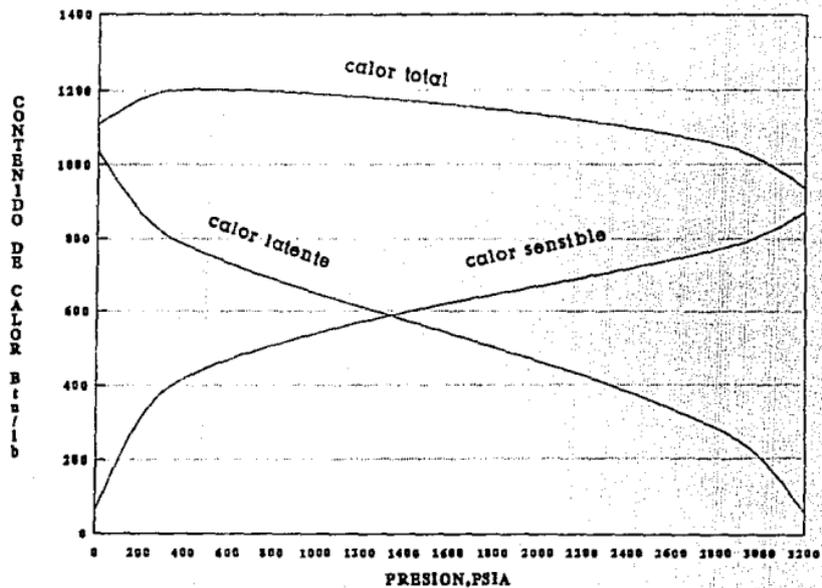


FIG. A.1.

CALOR ESPECIFICO DEL AGUA Y DEL AIRE
A UNA ATMOSFERA

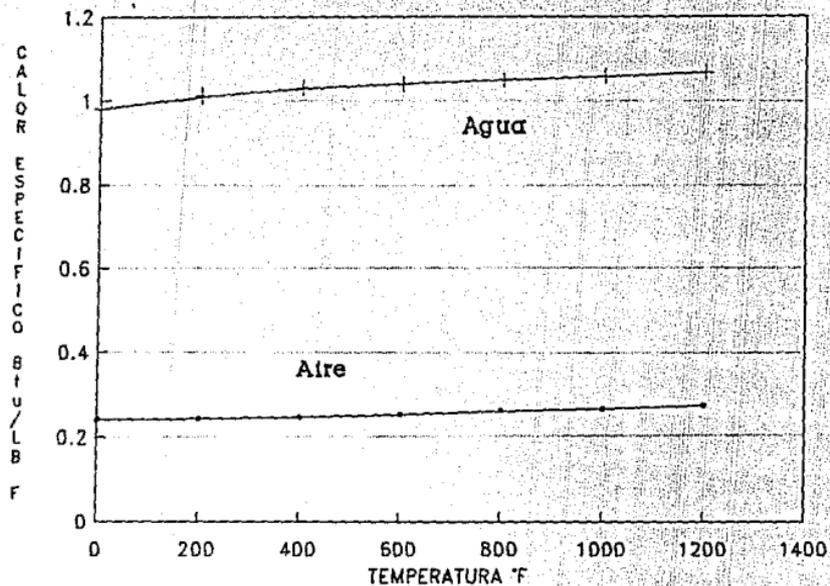


FIG. A.2

VARIACION DE LA TENSION DE SUPERFICIAL
DE ALGUNOS HIDROCARBUROS

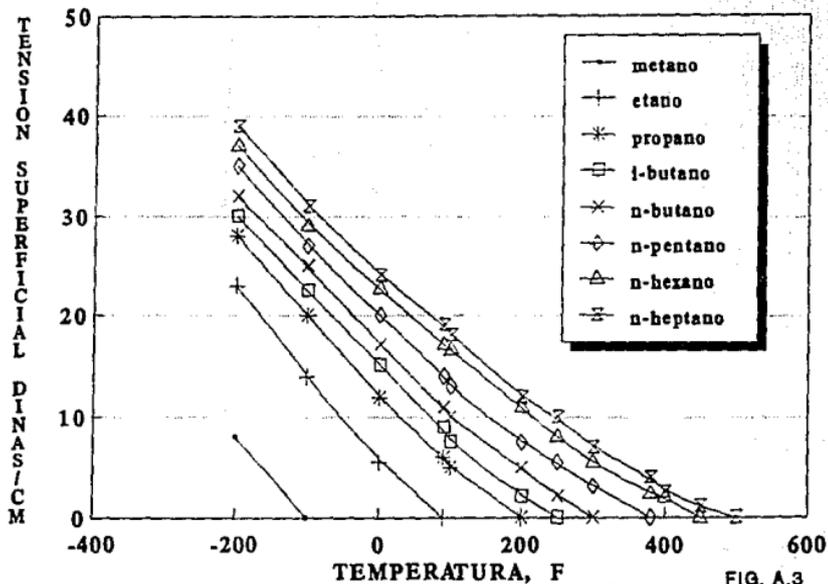


FIG. A.3

CONDUCTIVIDAD TERMICA Y VISCOSIDAD DEL AIRE

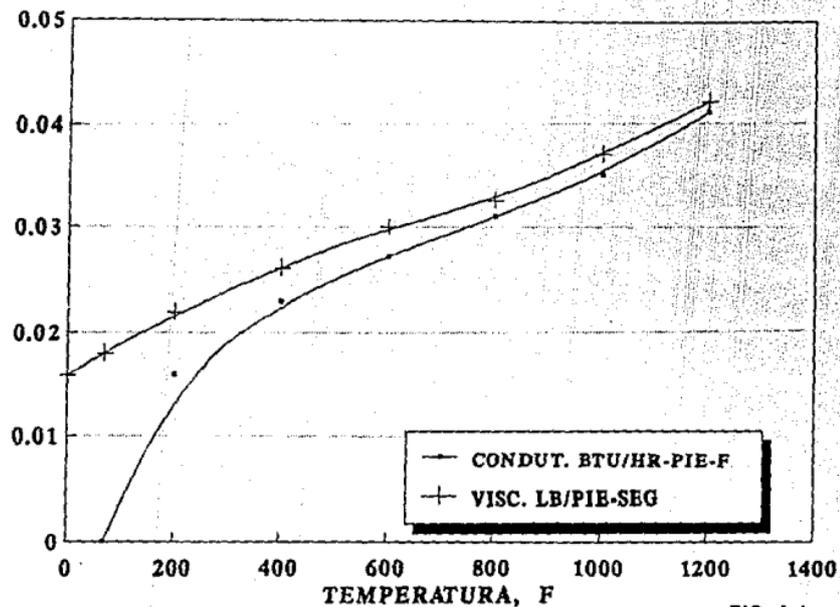


FIG. A.4

RELACION DE LA FUNCION ERROR

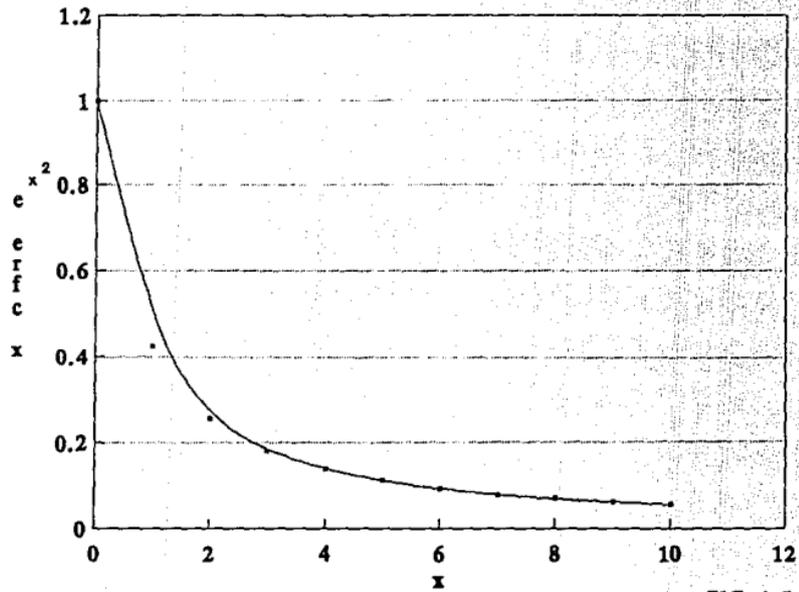


FIG. A.5

DIAGRAMA DE ESFUERZOS EN LA TR

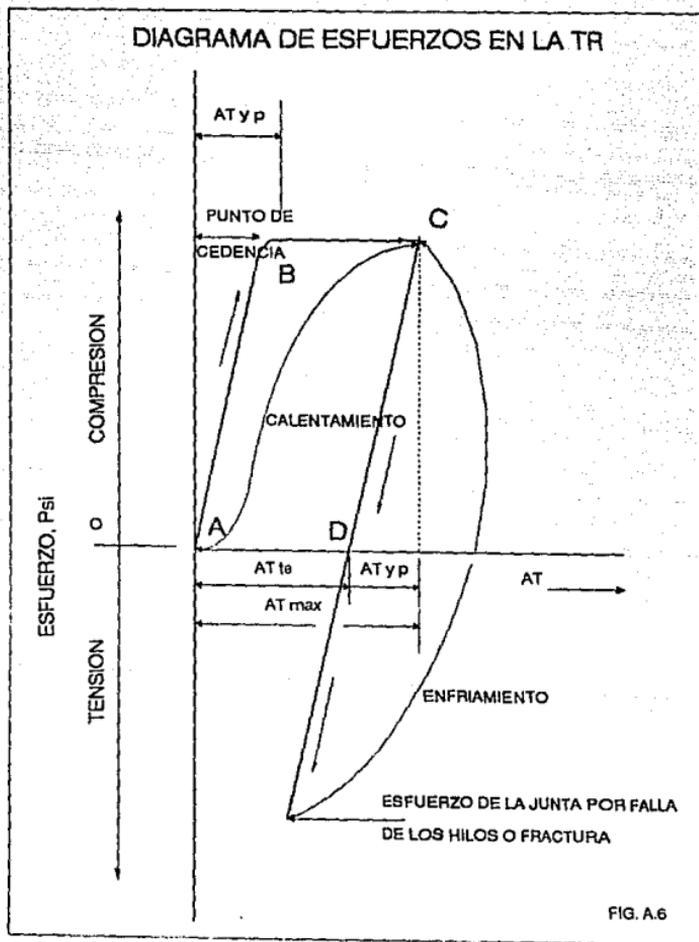


FIG. A.6

FACTOR DE FRICCIÓN PARA TUBERIAS
USUALES DE INYECCION-PRODUCCION

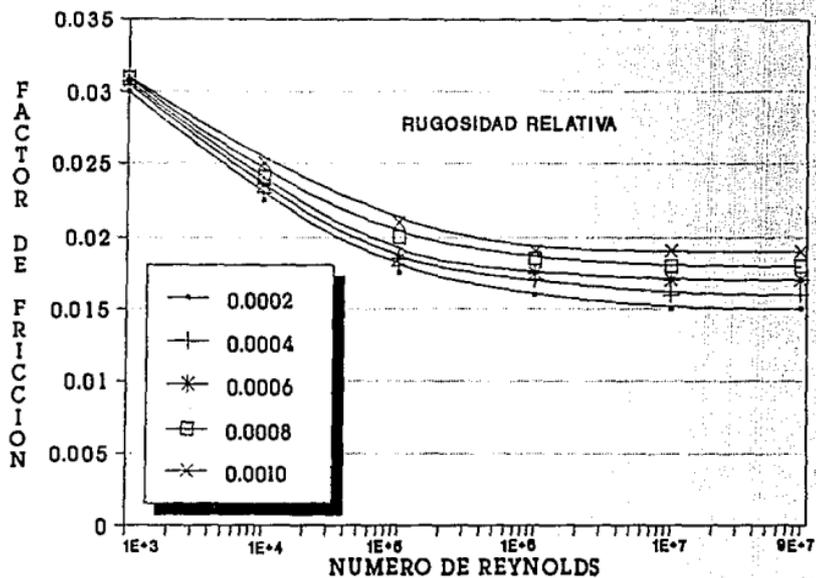


FIG. A.7

PORCENTAJE DE CALOR PERDIDO A LAS
FORMACIONES ADYACENTES

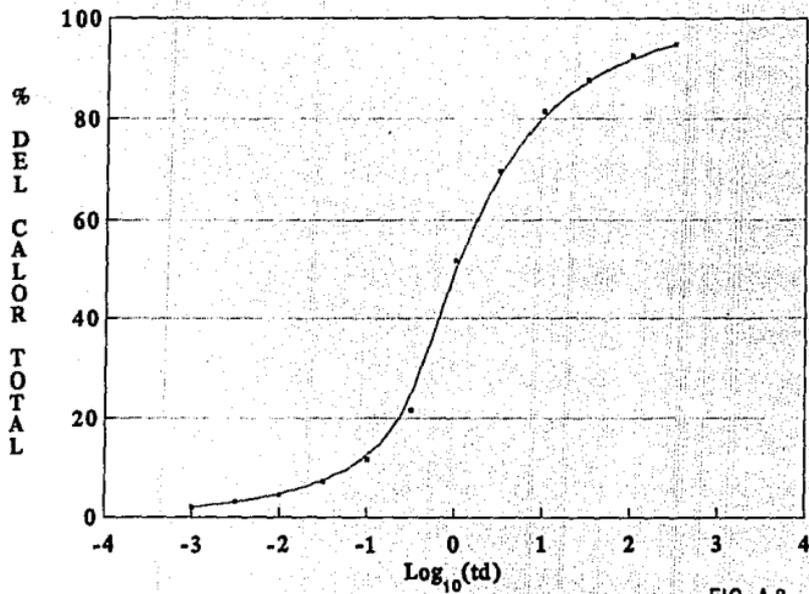


FIG. A.8

A P E N D I C E B

VARIACION DE LAS PROPIEDADES DEL VAPOR

VARIACION DE LA PRESION Y LA CALIDAD DEL VAPOR

Los cambios que ocurren en las propiedades del vapor en su recorrido hacia la formación, quedan definidos por las siguientes ecuaciones⁽¹⁷⁾:

$$dQ = dH - \frac{g dz}{g_c J} + \frac{v dv}{g_c J} - \frac{dW_s}{J} \quad (\text{B.1})$$

$$-VdP = -\frac{g dz}{g_c} + \frac{v dv}{g_c} + dF_r \quad (\text{B.2})$$

De las ecuaciones anteriores, considerando que el vapor no efectúa ni recibe trabajo, que $g = g_c$ y que $v = GV$, se tiene:

$$dQ = -\frac{dz}{J} + \frac{G^2}{gJ} VdV + dH \quad (\text{B.3})$$

$$-VdP = -dz + \frac{G^2}{g} VdV + dF_r \quad (\text{B.4})$$

Mediante la solución simultánea de las ecuaciones B.3 y B.4 se obtienen los cambios de la presión y la calidad del vapor con la profundidad. Puesto que la variación de la entalpía y del volumen específico del vapor están en función de la presión y de la calidad:

$$H = \phi_1(P, X)$$

$$V = \phi_2(P, X)$$

derivando:

$$dH = \frac{\delta H}{\delta X} dX + \frac{\delta H}{\delta P} dP \quad (B.5)$$

$$dV = \frac{\delta V}{\delta X} dX + \frac{\delta V}{\delta P} dP \quad (B.6)$$

Por otro lado, dado que el modelo también toma en cuenta la variación de la presión por efectos debidos a la fricción, se tiene:

$$dF_f = \frac{f G^2 V^2 dZ}{2gDi} \quad (B.7)$$

Dividiendo entre dZ las ecuaciones B.3 y B.4 y sustituyendo las Ecs. B.5, B.6 y B.7:

$$\frac{dQ}{dZ} = \frac{G^2 V}{Jg} \left[\frac{\delta V}{\delta X} \frac{dX}{dZ} + \frac{\delta V}{\delta P} \frac{dP}{dZ} \right] + \frac{\delta H}{\delta X} \frac{dX}{dZ} + \frac{\delta H}{\delta P} \frac{dP}{dZ} - \frac{1}{J} \quad (B.8)$$

$$\frac{VdP}{dZ} = -1 + \frac{G^2 V}{g} \left[\frac{\delta V}{\delta X} \frac{dX}{dZ} + \frac{\delta V}{\delta P} \frac{dP}{dZ} \right] + \frac{f G^2 V^2}{2gDi} \quad (B.9)$$

Despejando de (B.9) a dX/dZ , sustituyendola en (B.8) y despejando de ahí a dP/dZ se obtiene finalmente la Ec. 26.

De la Ec. B.4 se tiene:

$$\frac{G^2}{g} V dV = -V dP - dF_r + dZ \quad (\text{B.10})$$

sustituyendo (B.10) en (B.3):

$$dH = dQ + \frac{V dP}{J} + \frac{dF_r}{J} \quad (\text{B.11})$$

dividiendo (B.11) por dZ y sustituyendo dH de (B.5), (B.6) y (B.7) queda:

$$\frac{\delta H}{\delta X} \frac{dX}{dZ} + \frac{\delta H}{\delta P} \frac{dP}{dZ} = \frac{dQ}{dZ} + \frac{V}{J} \frac{dP}{dZ} + \frac{fG^2 V^2}{2JgDi} \quad (\text{B.12})$$

Despejando dP/dZ de (B.8) y (B.12), igualando y resolviendo para dX/dZ se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{dX}{dZ} = \frac{\left(\frac{dQ}{dZ} + \frac{1}{J}\right)\left(\frac{V}{J} - \frac{\delta H}{\delta P}\right) + \left(\frac{\delta H}{\delta P} + \frac{G^2 V}{Jg} \frac{\delta V}{\delta P}\right)\left(\frac{dQ}{dZ} + \frac{fG^2 V^2}{2JgDi}\right)}{\left(\frac{\delta H}{\delta X} + \frac{G^2 V}{Jg} \frac{\delta V}{\delta X}\right)\left(\frac{V}{J} - \frac{\delta H}{\delta P}\right) + \left(\frac{\delta H}{\delta P} + \frac{G^2 V}{Jg} \frac{\delta V}{\delta P}\right)\frac{\delta H}{\delta X}} \quad (\text{B.13})$$

dividiendo entre

$$\frac{\delta H}{\delta P} + \frac{G^2 V}{Jg} \frac{\delta V}{\delta P}$$

el numerador y el denominador de (B.13) se obtiene finalmente la ecuación 27.

PERDIDAS DE CALOR

dQ, Ec. B.1, define la cantidad de calor que pierde una libra de masa de vapor al circular por una longitud dZ de tubería. Considerando que el vapor no efectúa trabajo al exterior y que:

$$w dv = \frac{1}{dv^2}$$

$$g = g_c$$

$$v = GV$$

La ecuación B.1 queda:

$$dQ = dH - \frac{dZ}{J} + \frac{1}{2gJ} d(GV)^2$$

integrando esta última ecuación entre la superficie y la profundidad Z, se tiene:

$$Q_{10}^t = H_{10}^t - \frac{Z}{J} + \frac{G^2}{2gJ} V_{10}^2$$

como:

$$H_{10}^t = H_{0z} - H_{0cs}$$

y por la Ec. 37 :

$$H_{0z} - H_{0cs} = 91P^{.2574} + 13.18XP^{-.08774} - 91P_{iny}^{.2574} + 13.18X_{iny}P_{iny}^{-.08774}$$

finalmente se tiene el calor total perdido a una profundidad, Z

$$Q = \frac{91}{P^{.2574}} + \frac{13.18X}{P^{.08774}} + \frac{G^2}{2gJ} (V_{0z}^2 - V_{0cs}^2) - \frac{Z}{J} - \frac{91}{P_{iny}^{.2574}} - \frac{13.18X_{iny}}{P_{iny}^{.08774}}$$

METODO DE SOLUCION DE LAS ECUACIONES dP/dZ y dX/dZ .

La solución de este sistema de dos ecuaciones diferenciales implica la utilización de un método numérico, puesto que no es posible resolverlas en forma analítica. Por lo que sólo se encuentra una aproximación a su solución verdadera, cuya precisión depende de la de la subrutina numérica utilizada. En este trabajo se emplea el método de Milne⁽¹¹⁾ predictor-corrector y el de Runge-Kutta⁽¹¹⁾ 4° orden. El procedimiento es el siguiente:

Se divide la longitud de pozo, desde la superficie hasta el punto de la formación donde se ha de inyectar el vapor en un número finito N de intervalos iguales ΔZ , en cada uno de los cuales se encontrará una solución apoyada en el punto anterior.

El método de Milne requiere información previa de los tres primeros intervalos, para lo cual se utiliza Runge-Kutta.

Para $i = 0, 1, 2, 3$

$$K_{p1} = f_1(Z_i, P_i, X_i)$$

$$K_{x1} = f_2(Z_i, P_i, X_i)$$

$$K_{p2} = \Delta Z f_1\left(Z_i + \frac{1}{2}\Delta Z, P_i + \frac{1}{2}K_{p1}, X_i + \frac{1}{2}K_{x1}\right)$$

$$K_{x2} = \Delta Z f_2\left(Z_i + \frac{1}{2}\Delta Z, P_i + \frac{1}{2}K_{p1}, X_i + \frac{1}{2}K_{x1}\right)$$

$$K_{p3} = \Delta Z f_1(Z_i + \frac{1}{2} \Delta Z, P_i + \frac{1}{2} K_{p2}, X_i + \frac{1}{2} K_{x2})$$

$$K_{x3} = \Delta Z f_2(Z_i + \frac{1}{2} \Delta Z, P_i + \frac{1}{2} K_{p2}, X_i + \frac{1}{2} K_{x2})$$

$$K_{p4} = \Delta Z f_1(Z_i + \Delta Z, P_i + \frac{1}{2} K_{p3}, X_i + \frac{1}{2} K_{x3})$$

$$K_{x4} = \Delta Z f_2(Z_i + \Delta Z, P_i + \frac{1}{2} K_{p3}, X_i + \frac{1}{2} K_{x3})$$

posteriormente:

$$P_{i+1} = P_i + \frac{1}{6} (K_{p1} + 2K_{p2} + 2K_{p3} + K_{p4})$$

$$X_{i+1} = X_i + \frac{1}{6} (K_{x1} + 2K_{x2} + 2K_{x3} + K_{x4})$$

Utilizando Milne predictor-corrector:

para $i = 1, 2, \dots, N-3$

$$F_{p_i} = f_1(Z_i, P_i, X_i)$$

$$F_{x_i} = f_2(Z_i, P_i, X_i)$$

$$F_{p_{i+1}} = f_1(Z_{i+1}, P_{i+1}, X_{i+1})$$

$$F_{x_{1,1}} = f_2(Z_{1,1}, P_{1,1}, X_{1,1})$$

$$F_{p_{1,2}} = f_1(Z_{1,2}, P_{1,2}, X_{1,2})$$

$$F_{x_{1,2}} = f_2(Z_{1,2}, P_{1,2}, X_{1,2})$$

Predicción de P(z) y X(z) en el siguiente punto:

$$P_{p_{1,3}} = P_{1,1} + \frac{4}{3} \Delta Z (2F_{p_{1,1}} - F_{p_{1,2}} + 2F_{p_{1,2}})$$

$$X_{p_{1,3}} = X_{1,1} + \frac{4}{3} \Delta Z (2F_{x_{1,1}} - F_{x_{1,2}} + 2F_{x_{1,2}})$$

$$F_{p_{1,3}} = f_1(Z_{1,3}, P_{p_{1,3}}, X_{p_{1,3}})$$

$$F_{x_{1,3}} = f_2(Z_{1,3}, P_{p_{1,3}}, X_{p_{1,3}})$$

corrección:

$$P_{c_{1,3}} = P_{1,1} + \frac{\Delta Z}{3} (F_{p_{1,1}} + 4F_{p_{1,2}} + F_{p_{1,3}})$$

$$X_{c_{1,3}} = X_{1,1} + \frac{\Delta Z}{3} (F_{x_{1,1}} + 4F_{x_{1,2}} + F_{x_{1,3}})$$

Valores finales:

$$P_{t+3} = P_{t,3} + \frac{9}{121}(P_{t,3} - P_{t,3})$$

$$X_{t+3} = X_{t,3} + \frac{9}{121}(X_{t,3} - X_{t,3})$$

NOMENCLATURA Y UNIDADES

PROGRAMA		GENERAL
alpha	Difusividad térmica de la formación, pie^2/hr	α
beta	Coefficiente de expansión térmica volumétrica, $^{\circ}\text{R}^{-1}$	β
Ca	Calor específico del aire, $\text{Btu}/\text{lb-}^{\circ}\text{F}$	C_a
Can	Calor específico del fluido Esp. anular, $\text{Btu}/\text{lb-}^{\circ}\text{F}$	C_{an}
Cw	Calor específico del agua, $\text{Btu}/\text{lb-}^{\circ}$	C_w
dce	Diámetro externo de la tubería de revestimiento, pg	D_{ce}
dci	Diámetro interno de la tubería de revestimiento, pg	D_{ci}
deltaz	Incremento en la profundidad, pies	ΔZ
DFf	Dato factor de fricción, Adim.	
DNRe	Dato número de Reynolds, Adim	
drins	Espesor del aislante, Pg	Δr_{ins}
DRug	Dato rugosidad relativa de la tubería, Adim.	
dse	Diámetro externo de la línea superficial, pg	D_{se}
dsi	Diámetro interno de la línea superficial, pg	D_{si}
dte	Diámetro externo de la tubería de producción, pg	D_{te}
dti	Diámetro interno de la tubería de producción, pg	D_{ti}
DTs	Decremento de temperatura fluido-ambiente, $^{\circ}\text{F}$	ΔT_s
Eci	Emisividad térmica del int. TR, Adim.	ϵ_{ci}

PROGRAMA		GENERAL
Eins	Emisividad térmica del aislante, Adim.	ϵ_{ins}
Ete	Emisividad térmica del ext. TP, Adim.	ϵ_{te}
Fci	Factor geométrico de emisividad, Adim.	F_{ci}
FF	Factor de fricción, Adim.	f
ft	función transitoria de Ramey, Adim.	$f(t)$
g	Constante aceleración de la gravedad, pie/seg ²	g_e
Gr	Número de Grashof, Adim.	Gr
Grav	Constante aceleración de la gravedad, pie/hr ²	g
h	Espesor de la formación, pies	h
hc	Coefficiente de transferencia de calor por conducción y convección, Btu/hr-pie ² -°F	h_c
heat	Porcentaje de calor perdido a estratos adyacentes	
Hf	Entalpía del líquido saturado (calor sensible), Btu/lb _m	H_f
Hfg	Cambio de entalpía (calor latente), Btu/lb _m	H_{fg}
Hg	Entalpía del vapor saturado (calor total), Btu/lb _m	H_g
hr	Coefficiente de transferencia de calor por radiación, Btu/hr-pie ² -°F	h_r
Je	Equivalente mecánico del calor, 778 lb-pie/Btu	J
Ka	Conductividad térmica del aire, Btu/hr-pie-°F	K_a
Kcem	Conductividad térmica del cemento, Btu/hr-pie-°F	K_{cem}

PROGRAMA		GENERAL
Kc	Conductividad térmica de la tierra, Btu/hr-pie-°F	K_c
Khc	Conductividad térmica equivalente en el espacio anular, Btu/hr-pie-°F	K_{hc}
Kins	Conductividad térmica del aislante, Btu/hr-pie-°F	K_{ins}
Ktub	Conductividad térmica de la tubería, Btu/hr-pie-°F	K_{tub}
L1	Longitud de las líneas superficiales, pies	L
L2	Longitud del pozo, pies	L
M	Capacidad calorífica de la tierra, Btu/pie ³ -°F	M
mua	Viscosidad del fluido en el espacio anular, lb/pie-seg	μ_{ua}
mus	Viscosidad del vapor seco, cp	μ_s
muw	Viscosidad del agua, cp	μ_w
muws	Viscosidad del vapor húmedo, cp	μ_{ws}
NRe	Número de Reynolds, Adim.	Re
NZ	Número de intervalos	
P	Presión del vapor, lb/pg ₂	P
Pi	Presión de inyección de vapor, lb/pg ₂	P_{i0y}
por	Porosidad de la formación, Porcent.	ϕ
Pr	Número de Prandtl, Adim.	Pr
Qad	Calor perdido a estratos adyacentes, Btu/hr	Q
Qi	Gasto de inyección de vapor, Bl/día	i_i

PROGRAMA

GENERAL

Qm	Gasto másico de vapor, $\text{lb}_m/\text{pie}^2\text{-seg}$	G
Qpc	Porcentaje de calor perdido	
Qpcs	Porcentaje de calor perdido en superficie	
Qpct	Porcentaje total de calor perdido	
Qpcv	Porcentaje de calor perdido en el pozo	
Qper	Calor total perdido, Btu/hr	Q
QRa	Calor total perdido en líneas enterradas, Btu/hr	Q
Qlot	Calor total a la salida del generador, Btu/hr	Q
Qwh	Calor en la cabeza del pozo, Btu/hr	Q
rce	Radio externo de la tubería de revestimiento, pies	r_{ce}
rci	Radio interno de la tubería de revestimiento, pies	r_{ci}
rh	Radio del pozo, pies	r_b
rhoa	Densidad del aire, lb/pie^3	ρ_a
rhoan	Densidad del aire, lb/pie^3	ρ_{an}
rhov	Densidad del vapor, lb/pie^3	ρ_v
rins	Radio externo del aislante, pies	r_{in}
rse	Radio externo de la línea superficial, pies	r_{se}
rsi	Radio interno de la línea superficial, pies	r_{si}
rte	Radio externo de la tubería de producción, pies	r_{te}
rti	Radio interno de la tubería de producción, pies	r_{ti}
Rug	Rugosidad relativa de la tubería, Adim.	

PROGRAMA

GENERAL

sigma	Constante de Stefan-Boltzman, 1.713×10^{-8} Btu/pie ² -hr-°R ⁴	σ
Soi	Saturación inicial de aceite, Porcent.	S_{oi}
Sor	Saturación residual de aceite, Porcent.	S_{or}
t	Tiempo, días	t
Ta	Temperatura ambiente, °F	T_a
Tav	Temperatura promedio, °F	T_{av}
Tci	Temperatura en el interior de la TR, °F	T_{ci}
Te	Temperatura de la formación, °F	T_c
Tf	Temperatura del fluido o vapor, °F	T_f
Th	Temperatura en la interfase cemento-formación, °F	T_h
Tins	Temperatura en el aislante, °F	T_{ins}
Tti	Temperatura en el interior de la TP, °F	T_u
Tv	Temperatura del fluido o vapor, °F	T_v
Tys	Temperatura de cedencia de la TR, °F	T_{ys}
Ute	Coficiente total del transferencia de calor, Btu/hr-pie ² -°F	U_{te}
Va	Velocidad del aire, millas/hr	V_a
Ves	Volumen específico del vapor @ C.S., pie ³ /lb	V_{gcs}
Vs	Volumen específico del vapor, pie ³ /lb	V_g
Vw	Volumen específico del agua, pie ³ /lb	V_w

PROGRAMA**GENERAL****Vz** Volumen específico del vapor a la prof. Z, pie³/lb**V_{gr}****X** Calidad del vapor, Adim**X****Xi** Calidad del vapor de inyección Adim.**X_{inj}**

REFERENCIAS

1. Burden, Faires: Numerical Analysis, Wadsworth International (1981) E.U.
2. Butler R.M.: Thermal Recovery Of Oil And Bitumen, Prentice Hall Inc. (1991) 360-370
3. Carcoana A.: Applied Enhanced Oil Recovery, Prentice Hall (1992) U.S.A., Capt. 2
4. Carslaw, H.S. and Jaeger J.C.: Conduction of Heat in Solids, Oxford U. Press Amen House. (1959) London. 61
5. Carter G. And Smith D.K.: Properties Of Cementing Compositions At Elevated Temperatures, Trans. AIME 213 (1958) 227
6. Craft B.C. And Holden W.R.: Well Design Drilling And Production, Prentice Hall Inc. (1962) 101-146
7. Donaldson E.C. And Chilingarian G.V.: Enhanced Oil Recovery, II Processes And Operations, Elsevier Science Pub. Co. Inc. (1989)
8. Earlougher R.C.Jr.: " Some Practical Considerations In The Design Of Steam Injection Wells ", J. Pet. Tech. (Jan. 1969) 79-86
9. Farouq Ali: Oil Recovery by Steam Injection, Bradford Pa. Producers (1970), U.S.A.
10. Hearn C.C.: " Effect Of Latent Heat Content Of Injected Steam In A Steam Drive ", J. Pet. Tech. (Apr. 1969) 374-375
11. Iriarte V. Balderrama R.: Métodos Numéricos, Ed. Trillas-FI, UNAN, (1990) Mex.
12. Katz D.L.: Handbook of Natural Gas Engineering, McGraw-Hill Book Co. (1959), U.S.A.

13. Lopez C.F.F. y Rivera J.J.: Simulación matemática de los mecanismos de transferencia de calor hacia las formaciones que atraviesan los pozos inyectoros de vapor, Inst. Mex. Pet. Publicación 72BH/089 (1971)
14. McAdams W.H.: " Heat Transmission ", McGraw-Hill Book Co. Inc. (1954) U.S.A.
15. Morales Jesús: " Estimulación con vapor en el campo Cacalilao ", Ingeniería Petrolera (Mayo de 1969) 5-19
16. Marx J.W. And Langenheim R.H.: " Reservoir Heating By Hot Fluid Injection ", Trans. AIME 216 (1959) 312
17. Pacheco E.F. And Farouq Ali: " Wellbore Heat Losses And Pressure Drop In Steam Injection ", J. Pet. Tech. (Feb. 1972) 139-144
18. Prats M.: Thermal Recovery, Soc. Pet. Eng. Of AIME Monogr.(1982) Dallas, Tx. 126-155, 202-237
19. Ramey, H. J. Jr.: " Wellbore Heat Transmission ", J. Pet. Tech. (Apr. 1962), 427-435
20. Reyes Santos y Rodríguez Fernando: Alternativas de inyección de vapor en el campo Moloacán, Proyecto D-2228, Inst. Mex. del Petróleo. (Sept. 1989)
21. Rohsenow, W. M.: Handbook of Heat Transfer, McGraw-Hill (1973), N.Y, U.S.A.
22. Rubenshtein L.I.: " The Total Heat In Injection Of A Hot Liquid Into A Stratum " Neft I Gas (1959)
23. Saucier R.J.: " Considerations in Gravel Pack Design ", J. Pet. Tech. (1974) 205-212
24. Schumacher M.M.: Enhanced Recovery of Residual and Heavy Oils, Energy Technology Review 59, Noyes Data Co. (1980), U.S.A. 71

25. Smith C.R.: *Mechanics Of Secondary Oil Recovery* , Robert E. Krieger Pub. Co. Inc. (1966) 424
26. Somerton W.H.: *Thermal Properties And Temperature Related Behavior Of Rock-Fluid Systems*, Elsevier Science Pub. Co.Inc. (1992)
27. Teran de la G, Benito y Nogueroń, T., David.: " Here's How to Find Pressure Drop in Steam Lines ", *Oil and Gas Journal* (May 1971) 107-109
28. Van Poolen H.K. And Associates, Inc.: *Enhanced Oil Recovery*, Penn Well Books (1980) Capt. 2
29. Willhite G.P.: " Overall Heat Transfer Coefficient In Steam And Hot Water Injection Wells ", *J. Pet. Tech.* (May. 1967) 607-615
30. Willhite G.P. And Dietrich W.K.: " Design Criteria For Completion Of Steam Injection Wells ", *J. Pet. Tech.* (Jan. 1967) 15-21
31. White P.D. And Moss J.T.: *Thermal Recovery Methods*, Penn Well (1983) Tulsa, Ok. Caps. 1 y 6
32. *Catálogo Vitroform: Aislamiento Preformado Para Tuberías.* (1992)