



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA DE GEOLOGIA, MINAS Y PETROLEOS

"SIMULACION MATEMATICA DE UN PROCESO DE INYECCION CONTINUA DE VAPOR"

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE :

INGENIERO DE PETROLEO

PRESENTADA POR :

BRYAN SOTO PINTO



BIBLIOTECA FICT  
**ESPOL**

# AGRADECIMIENTO



**BIBLIOTECA FICT  
ESPOL**

A LA ESPOL

A LA FACULTAD DE I.G.M.P.

AL ING. RICARDO GALLEGOS O.,  
DIRECTOR DE TESIS

A MIS PROFESORES

## DEDICATORIA

A MI ESPOSA E HIJAS :

JUANY, BRIANITA Y GABRIELITA

A MIS PADRES :

LUIS Y LAURA

A MIS HERMANOS :

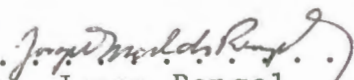
GABRIEL, ERIC, IVONNE Y MAURICIO

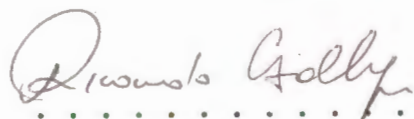
A MIS SOBRINOS :

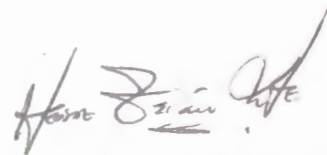
ERIKA Y JOSE MAURICIO



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

  
.....  
Ing. Jorge Rengel  
DECANO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERIA GEOLOGIA, MINAS Y  
PETROLEO

  
.....  
Ing. Ricardo Gallegos  
DIRECTOR DE TESIS

  
.....  
Ing. Heinz Terán  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

  
.....  
Ing. Carlos Arnao  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



## DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas  
expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamen  
te; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la  
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la  
ESPOL)

**BIBLIOTECA**



FACU...  
EN CIEN... LA TESIS

.....  
BRYAN LUIS SOTO PINTO

## RESUMEN

El presente trabajo describe tres programas de cómputo que sirven para determinar los parámetros térmicos que son generados en superficie, pozo y formación durante la inyección continua de vapor.

La investigación se realizó utilizando teoría y modelos analíticos que describen el proceso en forma aproximada, además la ejecución de los programas se probaron con datos de entrada muy comunes en yacimientos de crudos pesados.

Por considerar que nuestro país posee yacimientos de crudos pesados, ejemplo PUNGARAYACU, cuyas características petrofísicas se encuadran dentro de los criterios generales de diseño de recuperación de petróleo utilizando inyección continua de vapor, veremos que la presente tesis será aplicativo al futuro incremento de reservas petroleras en base a la explotación de este tipo de yacimientos.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



## INDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
RESUMEN . . . . .	VI
INDICE GENERAL . . . . .	VII
INDICE DE FIGURAS . . . . .	X
INDICE DE TABLAS . . . . .	XII
INTRODUCCION . . . . .	13
CAPITULO I	
CONSIDERACIONES TEORICAS . . . . .	19
1.1 Propiedades térmicas del agua y vapor . . . . .	19
1.1.1 Temperatura de saturación del agua . . . . .	20
1.1.2 Calor específico del agua y del vapor . . . . .	21
1.1.3 Calor sensible . . . . .	22
1.1.4 Calor latente de vaporización . . . . .	25
1.1.5 Entalpía del vapor seco y saturado . . . . .	27
1.1.6 Calidad del vapor - Vapor húmedo . . . . .	28
1.1.7 Volumen específico . . . . .	29
1.1.8 Vapor sobrecalentado . . . . .	31
1.2 Propiedades térmicas de rocas y fluidos . . . . .	33
1.2.1 Viscosidad del petróleo . . . . .	34
1.2.2 Viscosidad del agua y del vapor . . . . .	40
1.2.3 Densidad del petróleo . . . . .	41
1.2.4 Densidad del agua . . . . .	44
1.2.5 Calor específico . . . . .	44
1.2.6 Capacidad calorífica de rocas saturadas . . . . .	46

1.2.7	Conductividad térmica de líquidos y gases . . . . .	47
1.2.8	Conductividad térmica de rocas . . . . .	50
1.2.9	Difusividad térmica de rocas saturadas . . . . .	54
1.2.10	Permeabilidad relativa a tres fases . . . . .	55
1.3	Pérdidas de calor durante la transmisión de fluídos calientes . . . . .	58
1.3.1	Mecanismos de transferencia de calor . . . . .	60
1.3.2	Coeficiente de transferencia de calor total . . . . .	66
1.3.3	Pérdidas de calor en líneas de superficie . . . . .	67
1.3.4	Cálculo de la calidad del vapor en el cabezal del pozo y en la cara de la arena . . . . .	81
1.3.5	Pérdidas de calor en el hoyo del pozo . . . . .	87
1.3.6	Método de Willhite . . . . .	88
1.3.7	Pérdidas de calor en las formaciones . . . . .	102

## CAPITULO II

	INYECCION CONTINUA DE VAPOR . . . . .	133
2.1	Mecanismos de recuperación en inyección continua de vapor . . . . .	134
2.2	Cálculo de la recuperación por inyección continua de vapor . . . . .	137



Pág.

2.3 Criterios de diseño para inyección continua de vapor . . . . .	151
CAPITULO III	
MODELACION . . . . .	151
3.1 Determinación del coeficiente de transferen- cia de calor total . . . . .	151
3.2 Cálculo de pérdidas de calor . . . . .	164
3.2.1 Cálculo de pérdidas de calor en lí- neas superficiales . . . . .	164
3.2.2 Cálculo de pérdidas de calor en el po- zo . . . . .	171
3.2.3 Cálculo de pérdidas de calor en la for- mación y determinación del recobro de petróleo vs. tiempo . . . . .	181
3.3 Programa computacional aplicado . . . . .	191
CAPITULO IV	
ECONOMIA DEL PROYECTO . . . . .	224
4.1 Análisis económico del modelo utilizado . . . . .	224
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES . . . . .	227
APENDICES . . . . .	231
BIBLIOGRAFIA . . . . .	246



## INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
1.1	TEMPERATURAS DE SATURACION DEL AGUA A DIFERENTES PRESIONES . . . . .	21
1.2	DIAGRAMA TEMPERATURA-ENTALPIA DEL AGUA . . . . .	26
1.3	CARTA ASTM DE VISCOSIDAD-TEMPERATURA . . . . .	37
1.4	CORRELACION GENERALIZADA DE VISCOSIDAD-TEMPERATURA . . . . .	39
1.5	ESQUEMA DE UN POZO SOMETIDO A INYECCION CONTINUA DE VAPOR . . . . .	59
1.6	TRANSFERENCIA DE CALOR EN TUBERIA SUPERFICIAL DESNUDA . . . . .	69
1.7	TRANSFERENCIA DE CALOR EN TUBERIA SUPERFICIAL AISLADA . . . . .	77
1.8	VISTA TRANSVERSAL DE UN POZO DE INYECCION DE VAPOR Y SU DISTRIBUCION DE TEMPERATURA . . . . .	89
1.9	TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN POZO CON TUBERIA DE PRODUCCION DESNUDA . . . . .	91
1.10	TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN POZO CON TUBERIA DE PRODUCCION AISLADA . . . . .	99
1.11	DISTRIBUCION DE LA TEMPERATURA ESCALONADA A UN TIEMPO ESPECIFICO, SUPUESTA POR MARX Y LANGENHEIM . . . . .	107
1.12	AREAS CALENTADAS POR EL VAPOR ( $A_V$ ) Y EL AGUA CALIENTE ( $A_H$ ) SEGUN MARX Y LANGENHEIM . . . . .	107



**BIBLIOTECA FICD5  
ESPOL**

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
1.13	FORMACION SOMETIDA A INYECCION CONTINUA DE VAPOR . . . . .	107
1.14	TASAS DE CALOR QUE ACTUAN EN UNA FORMACION SOMETIDA A INYECCION CONTINUA DE VAPOR . . . . .	108
1.15	ZONAS DE DESPLAZAMIENTO, DIAGRAMA DE FASES Y DISTRIBUCION DE TEMPERATURA DE UNA FORMACION SOMETIDA A INYECCION CONTINUA DE VAPOR . . . . .	113
1.16	PERDIDAS DE CALOR A LAS FORMACIONES ADYACENTES A UN TIEMPO $t$ , DE UNA FORMACION SOMETIDA A INYECCION CONTINUA DE VAPOR . . . . .	115
3.1	RELACION ENTRE EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL ( $h_s$ ) Y EL QUE ACTUA HASTA LA SUPERFICIE EXTERIOR DE LA TUBERIA SUPERFICIAL DESNUDA ( $h_s$ ) <sub>T</sub> . . . . .	165
3.2	RELACION ENTRE EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL ( $h'_s$ ) Y EL QUE ACTUA HASTA LA SUPERFICIE EXTERIOR DE LA TUBERIA SUPERFICIAL AISLADA ( $h'_s$ ) <sub>T</sub> . . . . .	168
3.3	GRAFICO PARA ESTIMAR $h_p$ y $h'_p$ SUPUESTO . . . . .	175





## INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
I	PROPIEDADES TERMICAS DEL AGUA Y VAPOR .	32
II	VALORES DE CORRELACION CALCULADOS SEGUN ASAAD . . . . .	53
III	DENSIDAD, CALOR ESPECIFICO, CONDUCTIVIDAD TERMICA Y DIFUSIVIDAD TERMICA DE ROCAS SE- LECCIONADAS, TOMADO DEL TRABAJO DE SOMERTON	57
IV	PARAMETROS DE RECUPERACION EN INYECCION CONTINUA DE VAPOR SEGUN EL NPC . . . .	150
V	FACTORES EMPIRICOS DE CAPTURA SEGUN EL NPC	150



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL






## INTRODUCCION

## CRUDOS PESADOS

FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA

El término "Crudo pesado" es generalmente usado para nombrar a un petróleo que tiene una gravedad API menor o igual a 25°, viscosidad de miles de centipoises y móvil a condiciones de yacimiento, notándose que de esta clasificación se excluirán las arenas asfálticas (tar sands).

## DEPOSITOS DE CRUDOS PESADOS

Grandes depósitos de crudo pesado ocurren en Canadá, Estados Unidos, Venezuela y Ecuador. En nuestro país el principal depósito de crudo pesado es el de Pungarayacu, campo que se encuentra ubicado aproximadamente en línea recta, a 110 Km al Sudeste de Quito, e inmediatamente al Norte de la población de Tena, en la provincia del Napo. Este campo petrolero, aunque no está bien definido todavía, cubre un área de más de 300 Km<sup>2</sup>, con 14 pozos perforados; la gravedad API del petróleo varía en un rango de 8 a 14, y se estima que se han descubierto aproximadamente 6 billones de barriles de petróleo pesado IN  con tenidos en la formación Hollín (Cretácico Inferior).

## PROBLEMAS CON CRUDOS PESADOS

A parte de la recuperación de petróleo del yacimiento, un sinnúmero de problemas están asociados con la operación, transporte y mercadeo de crudos pesados; los más importantes son :

- a) El precio de un crudo pesado es más bajo que el del crudo convencional.
- b) Es necesario aplicar técnicas especiales para el levantamiento de estos crudos desde el fondo del pozo hasta superficie.
- c) La Refinación de este tipo de crudo es problemática ya que contiene elevados porcentajes de azufre y metales.
- d) El transporte de este crudo en tuberías superficiales es muy dificultoso porque para hacerlo fluir a satisfacción es necesario aplicar grandes gradientes de presión lo que origina elevación de viscosidad.

## RECOBRO POR METODOS TERMICOS

Se conoce por recuperación térmica, a todo proceso donde se inyecta u origina energía térmica en el yacimiento con el fin de aumentar la recuperación de petróleo.

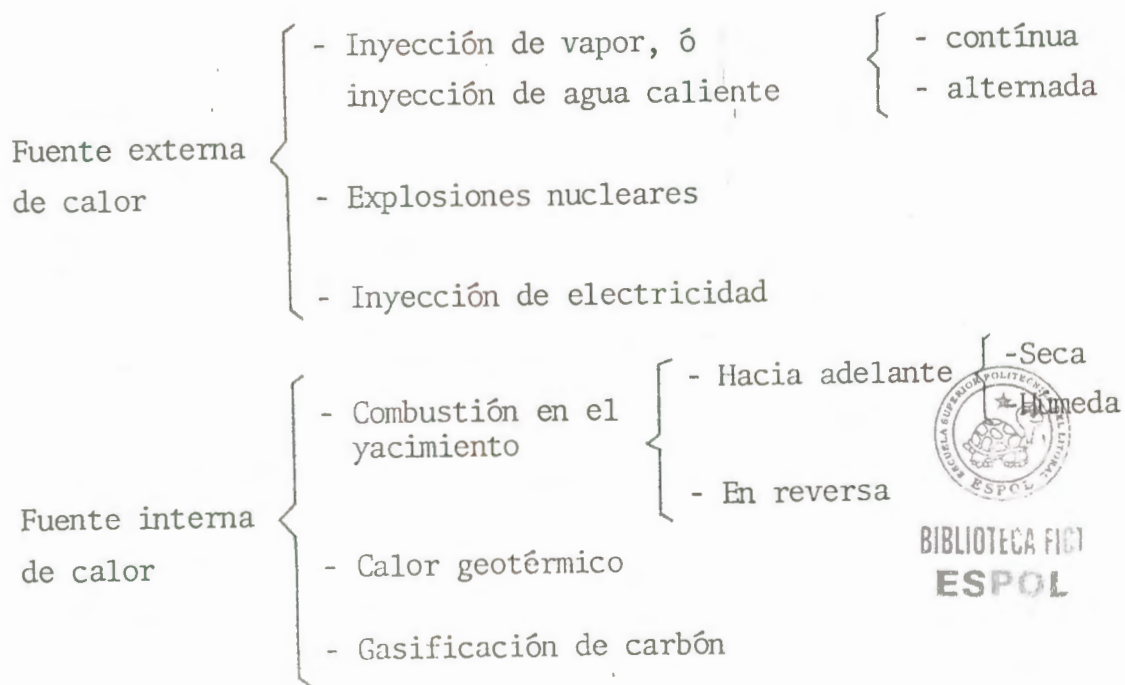


BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

La aplicación de métodos térmicos, tiene como objetivo básico la reducción de la viscosidad del petróleo aplicando calor, con el fin de mejorar su movilidad; por lo tanto estos métodos son adecuados en yacimientos que contienen crudos en el rango de 5° a 20° API y en ciertas ocasiones también se los aplica en yacimientos que contienen crudos no viscosos de hasta 45° API pero que tienen baja permeabilidad.

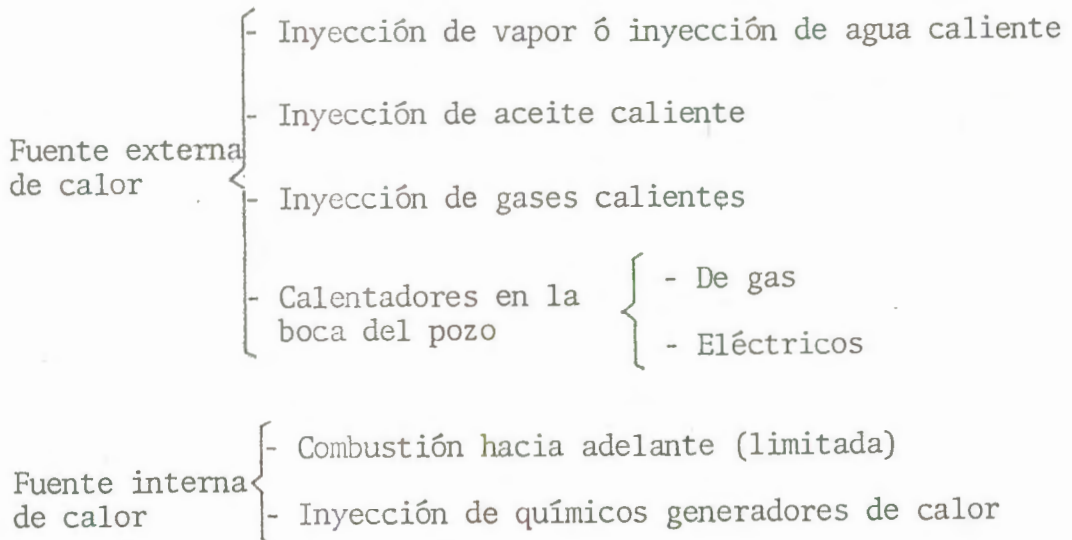
Antes de proceder a discutir la inyección continua de vapor, estableceremos la clasificación general de los métodos térmicos asociados con operaciones de recuperación de petróleo y gas :

a) En la formación :



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

b) En la vecindad del pozo : (radio de 20 - 30 pies)



c) En el pozo :

- Inyección de vapor para remover parafinas
- Acidificación

De estos métodos, los más comúnmente utilizados son : inyección de vapor, agua caliente y combustión en el yacimiento.

#### INYECCION CONTINUA DE VAPOR

Es un proceso mediante el cual se suministra en forma continua vapor húmedo a un medio poroso suficientemente largo, inicialmente saturado con petróleo y agua con nata. El petróleo en la vecindad de la boca del pozo es vaporizado parcialmente y desplazado hacia adelante.

El vapor que avanza se va condensando gradualmente debido a las pérdidas de calor hacia las formaciones adyacentes, generando así una zona de agua caliente, el cual va desplazando petróleo y enfriándose a medida que avanza, hasta finalmente alcanzar la temperatura original del yacimiento.

Desde este punto en adelante el proceso de desplazamiento prosigue como si se tratara una inyección de agua fría. Así, se puede observar que se distinguen 3 zonas diferentes :

- Zona de vapor
- Zona de agua caliente, y
- Zona de agua fría.

Normalmente el vapor que se utiliza en inyección continua de vapor es húmedo, ya que puede transportar más calor que el agua caliente y además es capaz de mantener en solución las impurezas sólidas, que de otra manera se depositan en las calderas o cualquier otro equipo del sistema de generación de vapor, reduciendo así su eficiencia y vida útil.

Una calidad de vapor entre 80 y 90%, es el valor promedio que normalmente se utiliza en inyección continua de vapor, sin embargo tales cifras pueden variar de acuerdo a las

propiedades del agua usada y al tratamiento al que ha sido sometida, es por esto que el contenido de calor del vapor húmedo se reduce con la reducción de la calidad del vapor.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



## CAPITULO I

### CONSIDERACIONES TEORICAS

Para mayor comprensión del método de inyección continua de vapor, se requiere previamente tener conocimiento de las propiedades térmicas de rocas y fluidos y las pérdidas de calor.

#### 1.1 PROPIEDADES TERMICAS DEL AGUA Y VAPOR

El gran interés en la inyección continua de vapor como proceso de recuperación de petróleo, radica en las excelentes propiedades térmicas del agua, bien sea en estado líquido o de vapor y en la abundancia de ella sobre la tierra.

Un claro entendimiento de las propiedades térmicas del agua, es básico para la eficiente utilización de la energía calorífica en tales operaciones.



A continuación se discuten brevemente las propiedades térmicas del agua y vapor, y se presentan correlaciones para su estimación.

### 1.1.1 TEMPERATURA DE SATURACION DEL AGUA

Es la temperatura a la cual se produce la ebullición (vaporización) del agua, a una determinada presión (Véase Fig. N° 1.1).

Al igual que otras propiedades térmicas del agua, la temperatura de saturación puede obtenerse de valores tabulados en la Tabla I de vapor, sin embargo en muchas ocasiones es más práctico el uso de la ecuación que derivó Farouq Alí para estimar la temperatura de saturación a una presión de saturación dada, o viceversa.

$$T_S = 115.1 P_S^{0.225} \quad (1.1)$$

donde:

$T_S$  = Temperatura de saturación (°F)

$P_S$  = Presión de saturación (psia)

El error de esta aproximación es de 1%, para presiones comprendidas entre 10 y 3,000 psia.



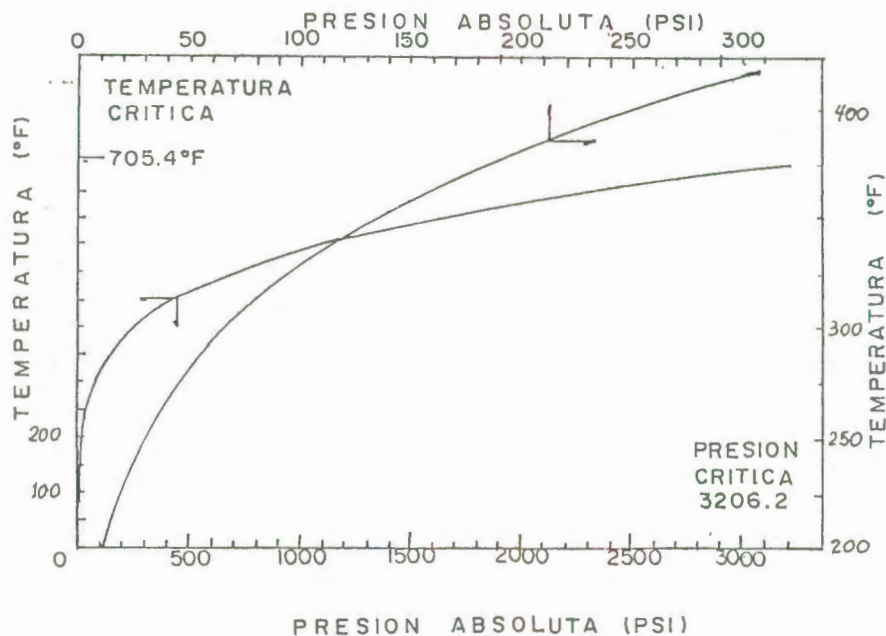


Fig. N° 1.1 TEMPERATURAS DE SATURACION DEL AGUA A DIFERENTES PRESIONES

### 1.1.2 CALOR ESPECIFICO DEL AGUA Y DEL VAPOR

Es la capacidad que tiene una sustancia para absorber calor y se mide como la cantidad de calor que una libra masa de sustancia debe absorber para aumentar la temperatura a 61°F.

En general, el calor específico de una sustancia no es constante, al contrario depende de la temperatura a la cual se mide.

Excepto por el amoníaco líquido, el agua bajo condiciones normales (14.7 psia y 60°F), tiene el más alto calor específico (1 Btu/lb-°F) que todos los líquidos conocidos, por esto el agua es capaz de contener y transportar más calor que cualquier otro líquido a la misma temperatura.

El calor específico del vapor es del orden de (0.56 Btu/lb-°F) y al igual que el agua (1 Btu/lb - °F) varían muy poco con temperatura, por lo que para propósitos prácticos pueden considerarse constantes.

### 1.1.3 CALOR SENSIBLE

Refiriéndonos al calor sensible del agua saturada, a una presión de saturación constante, es la cantidad de calor utilizada para calentar una libra de agua de calor específico  $C_a$ , desde la temperatura datum de 32°F hasta alcanzar la temperatura de saturación.

Luego :

$$Q_{as} = m C_a (T_S - T_D) = (1 \text{ lb}) C_a (T_S - 32) \quad (1.2)$$

donde:

$Q_{as}$  = Calor sensible del agua saturada (Btu)

$m$  = Masa del agua (1 lb)

$C_a$  = Calor específico promedio del agua tomado en el rango de 32°F a  $T_S$ , para propósitos prácticos se considera 1 Btu/lb-°F

$T_S$  = Temperatura de saturación del agua

$T_D$  = Temperatura datum (32°F = 0°C)

#### -ENTALPIA DEL AGUA SATURADA :

Es la cantidad de calor contenido en una libra de agua saturada a la temperatura de saturación, por tanto el contenido de calor a este punto estará dado por el calor sensible del agua saturada, esto es :

$$h_{as} = \frac{Q_{as}}{1 \text{ lb}} = C_a (T_S - 32)$$

El valor de la entalpía del agua saturada se lo puede obtener de la Tabla I de vapor, o estimar mediante la ecuación :

$$h_{as} = 91.0 P_S^{0.2574} \quad (1.4)$$



FACULTAD DE ING.  
CIENCIAS DE LA TIERRA



BIBLIOTECA (1.5)  
ESPOL

donde :

$h_{as}$  = Entalpía del agua saturada (Btu/lb)

$P_s$  = Presión de saturación (psia)

El error de esta aproximación es menor al 0.3%, para presiones comprendidas entre 15 y 1,000 psia.

Nótese, que la entalpía del agua saturada referida a la temperatura datum del yacimiento, está dada por :

$$h_{as,y} = h_{as} - h_{a,y} \quad (1.5)$$

donde:

$h_{a,y}$  = Entalpía del agua a la temperatura del yacimiento que estará dado por el calor contenido en 1 lb de agua a temperatura de yacimiento considerando temperatura datum 32°F, esto es :

$$h_{a,y} = \frac{Q_a}{1 \text{ lb}} = C'_a (T_y - 32) \quad (1.6)$$

$Q_a$  = Calor sensible del agua a la temperatura del yacimiento (Btu)

$C'_a$  = Calor específico promedio del agua, tomado en el rango de 32°F a  $T_y$  (Btu/lb-°F)

$T_y$  = Temperatura del yacimiento (°F)

#### 1.1.4 CALOR LATENTE DE VAPORIZACION

Refiriéndonos al calor latente de vaporización del agua, a una presión de saturación constante, es la cantidad de calor utilizada en calentar 1 libra de agua saturada hasta pasar al estado de vapor completo sin variar la temperatura de saturación.

El calor latente de vaporización del agua puede leerse de la Tabla I de vapor o estimarse mediante la ecuación desarrollada por Parouq

Allí :

$$L_V = 1,318 P_S^{-0.08774} \quad (1.7)$$

donde:

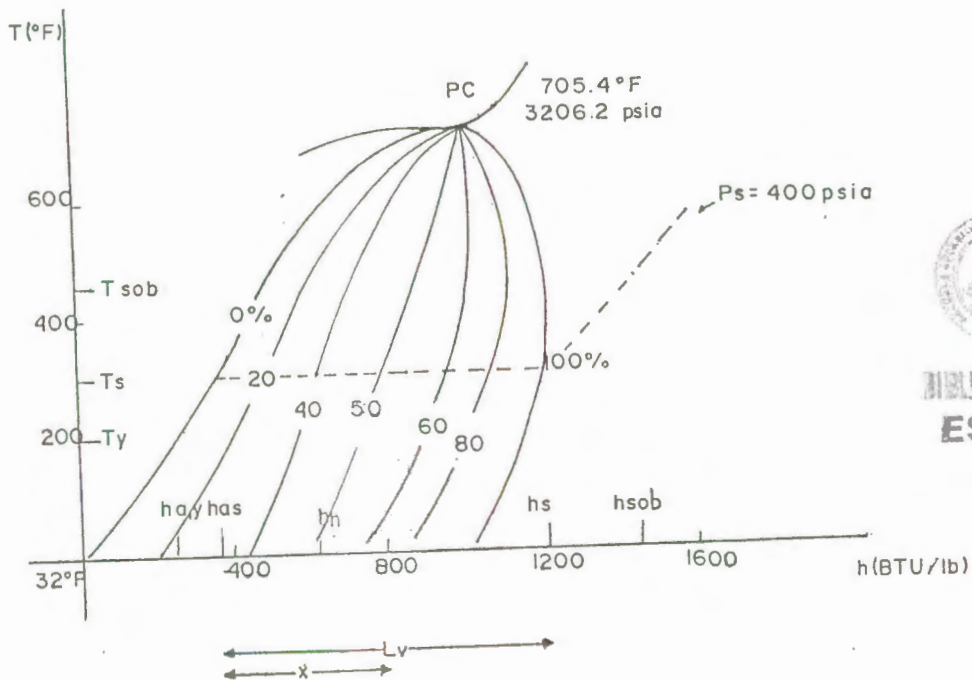
$L_V$  = Calor latente de vaporización del agua (Btu/lb)

$P_S$  = Presión de saturación (psia)



El error de aproximación es menor al 1.9%, para presiones comprendidas entre 15 y 1,000 psia.

NOTA : El comportamiento de fases del agua descrito a través de las definiciones presentadas en las secciones anteriores, puede resumirse y presentarse gráficamente en el siguiente diagrama de temperatura - entalpía.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Fig. N° 1.2 DIAGRAMA TEMPERATURA-ENTALPIA DEL AGUA

### 1.1.5 ENTALPIA DEL VAPOR SECO Y SATURADO

Es la cantidad de calor total contenida en 1 libra de vapor seco y saturado a la temperatura de saturación, por tanto el contenido de calor a este punto estará dado por la suma de la entalpía del agua saturada y el calor latente de vaporización del agua, luego :

$$h_s = h_{as} + L_v \quad (1.8)$$

La entalpía del vapor seco y saturado (comúnmente llamado calor total), se puede leer de la Tabla I de vapor o estimarse mediante la ecuación desarrollada por Farouq Alí :

$$h_s = 1,119 P_s^{0.01267}$$

donde:

$h_s$  = Entalpía del vapor seco y saturado (Btu/lb)

$P_s$  = Presión de saturación (psia)

El error de aproximación es menor al 0.3%, para presiones comprendidas entre 15 y 1,000 psia.



**BIBLIOTECA FICT  
ESPOL**



### 1.1.6 CALIDAD DEL VAPOR - VAPOR HUMEDO

#### CALIDAD DEL VAPOR :

Es el contenido de vapor en la mezcla (agua y vapor) a la temperatura de saturación, expresada como fracción del peso total.

Dicho de otra manera, es la fracción en peso de vapor húmedo que está seco y saturado, generalmente está dada por  $x$  en porcentaje.

#### VAPOR HUMEDO :

Es la mezcla de agua y vapor, coexistente a la temperatura de saturación.

#### ENTALPIA DEL VAPOR HUMEDO:

Es la cantidad de calor total contenida en 1 libra de vapor húmedo a la temperatura de saturación, dado que la entalpía del vapor húmedo es intermedia entre la del agua saturada y vapor seco y saturado, el contenido de calor a este punto estará dado por la suma de la entalpía del agua saturada más una fracción del



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



calor latente de vaporización del agua a la misma temperatura de saturación, luego :

$$h_h = h_{as} + x L_v \quad (1.10)$$

donde:

$$h_h = \text{Entalpía del vapor húmedo (Btu/lb)}$$

#### 1.1.7 VOLUMEN ESPECIFICO

Se refiere al volumen ocupado por la unidad de masa de una sustancia a determinada presión de saturación.

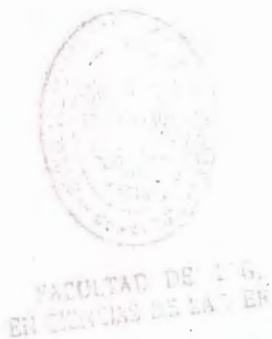
#### VOLUMEN ESPECIFICO DEL VAPOR HUMEDO :

Es el volumen ocupado por 1 libra de vapor húmedo a determinada presión de saturación, está dado por :

$$V_h = (1 - x) V_{as} + x V_s \quad (1.11)$$

donde:

V = Volumen específico, donde h, as, S se refieren a vapor húmedo, agua saturada y



vapor seco y saturado respectivamente  
(pie<sup>3</sup>/lb).

A bajas presiones, el volumen específico del agua saturada es despreciable, en comparación con el volumen específico del vapor seco y saturado, por tanto la ecuación anterior se aproxima a :

$$V_h \approx x V_s \quad (1.12)$$

Farouq Alí, determinó ecuaciones que permiten hallar el volumen específico del agua saturada y del vapor seco y saturado, para presiones comprendidas entre 15 y 1,000 psia, con un error máximo del 1.2%. Estas ecuaciones son:

$$V_{as} = 0.01602 + 0.000023(-6.6 + 3.74075 P_S^{0.225} + 8.70394257 P_S^{0.45}) \quad (1.13)$$

$$V_s = 363.9 P_S^{-0.9588} \quad (1.14)$$

donde:

$P_S$  = Presión de saturación (psia)

## 1.1.8 VAPOR SOBRECALENTADO

CALOR SENSIBLE DEL VAPOR SOBRECALENTADO :

A una presión de saturación constante, es la cantidad de calor utilizada para calentar una libra de vapor seco y saturado de calor específico  $C_v$ , desde la temperatura de saturación correspondiente hasta una temperatura sobrecalentada.

Luego:

$$Q_{sob} = m C_v (T_{sob} - T_s) = (1 \text{ lb}) C_v (T_{sob} - T_s) \quad (1.15)$$

donde:

$Q_{sob}$  = Calor sensible del vapor sobrecalentado  
(Btu).

$m$  = Masa de vapor seco y saturado (1 lb)

$C_v$  = Calor específico promedio del vapor a presión constante tomado en el rango de  $T_s$  a  $T_{sob}$

$T_{sob}$  = Temperatura del vapor sobrecalentado ( $^{\circ}\text{F}$ )

$T_s$  = Temperatura de saturación ( $^{\circ}\text{F}$ )

BIBLIOTECA



FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

T A B L A D E V A P O R						
PRESION DE SATURACION (lb/pul <sup>2</sup> )		T <sub>s</sub>	h <sub>as</sub>	L <sub>v</sub>	h <sub>s</sub>	V <sub>s</sub>
ABSOLUTA	MEDIDA	(°F)	(Btu/lb)	(Btu/lb)	(Btu/lb)	(pie <sup>3</sup> /lb)
100.0	85.3	327.81	298.40	888.8	1187.2	4.432
150.0	135.3	358.42	330.51	863.6	1194.1	3.015
200.0	185.3	381.78	355.36	843.0	1198.4	2.288
250.0	235.3	400.95	376.00	825.1	1201.1	1.8438
300.0	285.3	417.33	393.84	809.0	1202.8	1.5433
400.0	385.3	444.59	424.0	780.5	1204.5	1.1613
500.0	485.3	467.01	449.4	755.0	1204.4	0.9278
600.0	585.3	486.21	471.5	731.6	1203.2	0.7698
700.0	685.3	503.10	491.5	709.7	1201.2	0.6564
800.0	785.3	518.23	509.7	688.9	1198.6	0.5687
900.0	885.3	531.98	526.6	668.8	1195.4	0.5006
1000.0	985.3	544.61	542.4	649.4	1191.8	0.4456
1050.0	1035.3	550.57	550.0	639.9	1189.9	0.4018
1100.0	1085.3	556.31	557.4	630.4	1187.8	0.4001
1150.0	1135.3	561.86	564.6	621.0	1185.6	0.3802
1200.0	1185.3	567.22	671.7	611.7	1163.4	0.3619
1250.0	1235.3	572.42	578.6	602.4	1181.0	0.3450
1300.0	1285.3	577.45	585.4	593.2	1178.6	0.3293
1350.0	1335.3	582.35	592.1	584.0	1176.1	0.3148
1400.0	1385.3	587.10	598.7	574.7	1173.4	0.3012
1450.0	1435.3	591.73	605.2	565.5	1170.7	0.2884
1500.0	1485.3	596.23	611.6	556.3	1167.9	0.2765
1600.0	1585.3	604.90	624.1	538.0	1162.1	0.2548
1700.00	1685.3	613.15	636.3	519.6	1155.9	0.2354
1800.0	1785.3	621.03	648.3	501.1	1149.4	0.2179
1900.0	1885.3	628.58	660.1	482.4	1142.4	0.2021
2000.0	1985.3	635.82	671.7	463.4	1135.1	0.1873
2100.0	2085.3	642.77	683.3	444.1	1127.4	0.1746
2200.0	2185.3	649.46	694.8	424.4	1119.2	0.1625
2300.0	2285.3	455.91	706.5	403.9	1110.4	0.1513
2400.0	2385.3	662.12	718.4	382.7	1101.1	0.1507
2500.0	2485.3	668.13	730.6	360.5	1091.1	0.1307
2600.0	2585.3	673.94	743.0	337.2	1080.2	0.1213
2700.0	2685.3	679.55	756.2	312.1	1068.3	0.1123
2800.0	2785.3	684.99	770.1	284.7	1054.8	0.1035
2900.0	2885.3	690.20	785.4	253.6	1039.0	0.0947
3000.0	2985.3	695.36	802.5	217.8	1020.3	0.0858
3100.0	3085.3	700.31	825.0	165.1	993.1	0.0753
3200.0	3185.3	705.11	872.4	62.0	934.4	0.0580
3206.2	3191.5	705.40	902.7	0.0	902.7	0.0503

TABLA I PROPIEDADES TERMICAS DEL AGUA Y VAPOR

### ENTALPIA DEL VAPOR SOBRECALENTADO :

Es la cantidad de calor total contenida en una libra de vapor sobrecalentado a la temperatura sobrecalentada, por tanto el contenido de calor a este punto estará dado por la suma de la entalpía del vapor seco y saturado más el calor sensible del vapor sobrecalentado, luego :

$$h_{sob} = h_s + \frac{Q_{sob}}{1 \text{ lb}} = h_s + C_v(T_{sob} - T_s) \quad (1.16)$$

donde:

$$h_{sob} = \text{Entalpía del vapor sobrecalentado (Btu/1b)}$$

### 1.2 PROPIEDADES TERMICAS DE ROCAS Y FLUIDOS

En ciertos cálculos de inyección continua de vapor las propiedades térmicas de rocas y fluidos son consideradas constantes, aunque la realidad es que dependen de temperatura, por tanto con el objeto de volver más real un proyecto de inyección continua de vapor, será necesario estudiar estas propiedades y el efecto de temperatura sobre ellas.



BIBLIOTECA FICT

ESPOL

### 1.2.1 VISCOSIDAD DEL PETROLEO

En general, la viscosidad del petróleo disminuye con aumento de temperatura.

En operaciones de recuperación térmica existen 3 métodos de uso común para correlacionar viscosidad y temperatura de petróleos crudos:

a) ECUACION DE ANDRADE :

Basado en la linealidad observada entre viscosidad y el recíproco de temperatura a presión constante, Andrade propuso la siguiente ecuación :

$$u = A e^{(B/T)} \quad (1.17)$$

que en la práctica aplicando logaritmos naturales puede ser simplificada en :

$$\ln u = \ln \left[ A e^{(B/T)} \right]$$

$$\ln u = \ln A + \frac{B}{T} \ln e$$

$$\ln u = \ln A + \frac{B}{T} \quad (1.18)$$



donde:

$u$  = Viscosidad dinámica, centipoise

$A, B$  = Constantes

$T$  = Temperatura absoluta, °R ó °K.

Luego, conociendo los valores de " $u$ " a dos temperaturas diferentes y al reemplazar en la ecuación (1.17) se puede establecer un sistema de 2 ecuaciones con 2 incógnitas que al ser resueltas permiten determinar  $A$  y  $B$ , las que al ser reemplazadas en (1.17) generarán una ecuación general que nos permitirá estimar ( $u$ ) en función de ( $T$ ) desde el punto del congelamiento hasta el punto normal de ebullición del petróleo considerado.

b) CARTA ASTM DE VISCOSIDAD - TEMPERATURA :

Es aplicable para productos líquidos de petróleo crudo.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Esta carta se basa en la ecuación doble logarítmica de Walther :

$$\log \left[ \log(u_c + 0.8) \right] = -n \log(T/T_i) + \log \left[ \log(u_{ci} + 0.8) \right] \quad (1.19)$$

FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA

$u_c, u_{ci}$  = Viscosidad cinemática (u/e) a las temperaturas  $T$  y  $T_i$ , centistokes.

$T, T_i$  = Temperaturas, °K.

$n$  = Constante

Luego, conociendo los valores de  $u_c$  a dos temperaturas diferentes  $T$  y  $T_i$  y al reemplazarlos en (1.19) se obtendrá el valor de la constante  $n$ .

Con  $u_{ci}, T_i$  y  $n$  expresados en (1.19) se obtendrá una expresión matemática que servirá para estimar  $u_c$  en función de  $T$  para un crudo determinado.

Si no se desea realizar cálculos analíticos con la ecuación de Walther, siempre que se disponga de dos valores de  $u_c$  vs.  $T$  se puede utilizar la carta ASTM de viscosidad-temperatura (Véase Fig. N° 1.3) que está basada en la ecuación de Walther y en donde una variación de  $u_c$  vs.  $T$  da una línea recta.



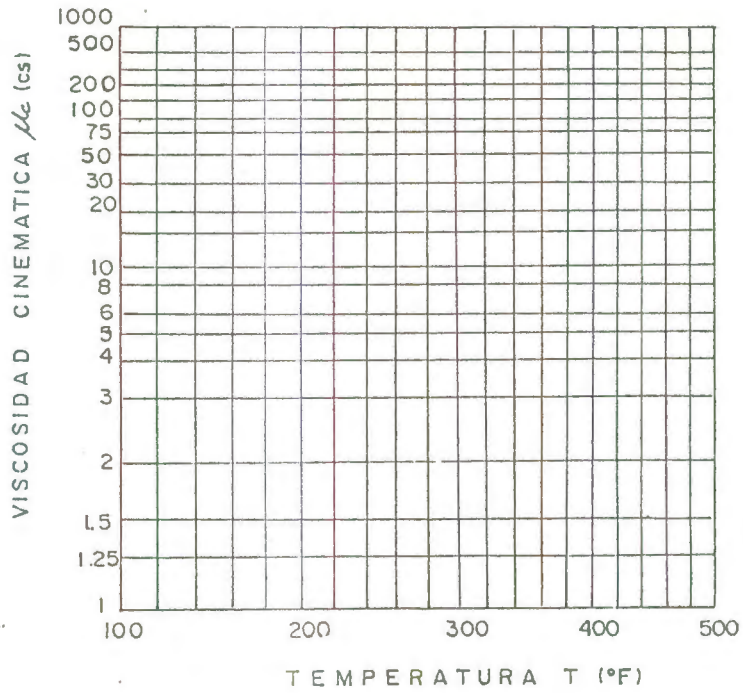


Fig. N° 1.3 CARTA ASTM DE VISCOSIDAD-TEMPERATURA



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

c) TECNICA DE UN SOLO PUNTO :

Una de las pocas técnicas disponibles para estimar la viscosidad de un petróleo a una alta temperatura conociendo sólo un valor de viscosidad a baja temperatura es la de Lewis y Squires, la cual envuelve el uso de la gráfica (Véase Fig. N° 1.4) denominada correlación generalizada de viscosidad-temperatura.

La gráfica se basa en datos de diferentes líquidos orgánicos y agua, donde su desviación en la predicción de  $\mu$  vs.  $T$  es generalmente menor al 20%.

Las flechas en la gráfica ilustran un ejemplo de cálculo :

Si  $\mu = 4.38$  cp a  $72^\circ\text{F}$  y se requiere conocer  $\mu$  @  $255^\circ\text{F}$ , primero localizar el punto que representa 4.38 cp en la escala de viscosidad y proceda horizontalmente a la curva luego proceda verticalmente hacia la línea base y mida una distancia de  $(255^\circ\text{F} - 72^\circ\text{F}) = 83.89^\circ\text{C}$  punto del cual se procede vertical

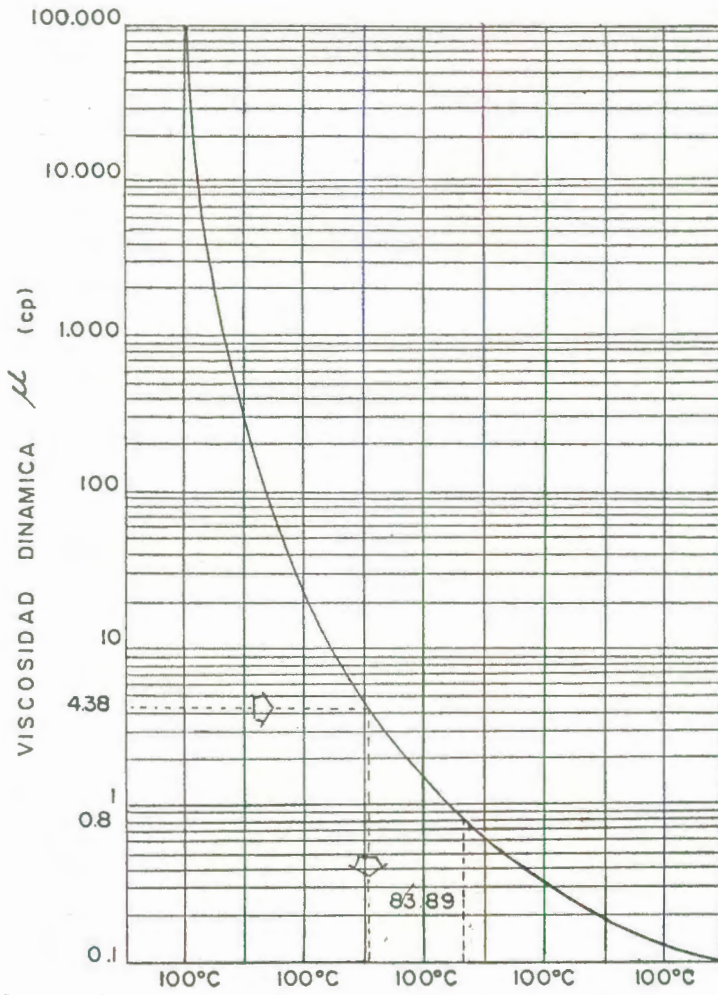


Fig. N° 1.4 CORRELACION GENERALIZADA DE VISCOSIDAD-TEMPERATURA

a la curva de donde se leerá la viscosidad correspondiente, esto es 0.8 cp.

### 1.2.2 VISCOSIDAD DEL AGUA Y DEL VAPOR

#### a) VISCOSIDAD DEL AGUA :

La viscosidad del agua en función de temperatura puede estimarse mediante la ecuación de Hawkins :

$$u_w = \frac{2.185}{0.04012 T + 0.0000051547 T^2 - 1}$$

donde:

$u_w$  = Viscosidad del agua, cp.

$T$  = Temperatura, °F.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

#### b) VISCOSIDAD DEL VAPOR :

La viscosidad del vapor saturado o sobrecalentado en función de presión y temperatura considerando presiones de hasta 800 psia y temperaturas de hasta 527°F, puede ser estimado mediante la ecuación de Kestin y Richardson :

$$u_V = 88.02 + 0.32827T + 0.0002135T^2 - \rho_V(1858 - 5.90T) \quad (1.21)$$

donde:

$u_V$  = Viscosidad del vapor saturado o sobrecalentado,  $10^{-6}$  poises.

$T$  = Temperatura, °C

$\rho_V$  = Densidad del vapor saturado o sobrecalentado,  $g/cm^3$ .

Este valor puede ser determinado para presiones de hasta 1,000 psia, mediante la siguiente ecuación derivada por F. Alí :

$$\rho_V = 0.0000440189 P^{0.9588} \quad (1.22)$$

donde:

$\rho_V$  = Densidad del vapor saturado o sobrecalentado,  $g/cm^3$ .

$P$  = Presión, psia.

### 1.2.3 DENSIDAD DEL PETROLEO

#### a) ECUACION DE LA DENSIDAD :

La ecuación de la densidad sirve para calcular la densidad del petróleo a cualquier

temperatura, por tanto :

$$\rho_T = \rho_{60} \{1.034125 - 0.0565(10^{-2})T + 0.2375(10^{-6})T^2\}, (1.23)$$

donde:

$\rho_T$  = Densidad del petróleo a la temperatura T, lb/pie<sup>3</sup> ó g/cm<sup>3</sup>.

$\rho_{60}$  = Densidad del petróleo a 60°F, lb/pie<sup>3</sup> ó g/cm<sup>3</sup>.

T = Temperatura, °F.



b) METODO DE WATSON'S :

BIBLIOTECA FICY  
ESPOL

Cuando la densidad del petróleo  $\rho_1$  está dado a una temperatura  $T_1$  y se requiere obtener la densidad del mismo petróleo pero a una temperatura  $T_2$ , se utilizará :

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{\Omega_1} \Omega_2 \quad (1.24)$$

donde:

$\rho_1$  = Densidad conocida del petróleo a temperatura  $T_1$ , lb/pie<sup>3</sup> ó g/cm<sup>3</sup>.

$\rho_2$  = Densidad buscada del petróleo a temperatura  $T_2$ , lb/pie<sup>3</sup> ó g/cm<sup>3</sup>.

$\Omega_1$  y  $\Omega_2$  = Factores de expansión térmica a las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , adimensionales.

Estos valores pueden ser determinados para temperaturas reducidas menores a 0.65 y presiones menores a 10 atmósferas, mediante la siguiente ecuación :

$$\Omega = 0.1745 - 0.0838 T_R \quad (1.25)$$

donde:

$\Omega$  = Factor de expansión térmica a cualquier  $T$ , adimensional.

$T_R$  = Temperatura reducida a cualquier temperatura, adimensional.

Este valor puede ser calculado usando:

$$T_R = \frac{T}{T_C} \quad (1.26)$$

donde:

$T_C$  = Temperatura crítica del petróleo considerado, °R.



#### 1.2.4 DENSIDAD DEL AGUA

La densidad del agua está dada por :

$$\rho_w = \frac{1}{0.01602 + 0.000023 G} \quad (1.27)$$

donde:

$$G = -6.6 + 0.0325 T + 0.000657 T^2 \quad (1.28)$$

$\rho_w$  = Densidad del agua, lb/pie<sup>3</sup>

T = Temperatura, °F.

#### 1.2.5 CALOR ESPECIFICO



Es la capacidad que tiene una sustancia para absorber calor y se mide como la cantidad de calor que 1 libra masa de sustancia debe absorber para aumentar la temperatura de 60 a 61°F.

Para la predicción del calor específico Gambill recomienda las siguientes correlaciones:

a) PARA HIDROCARBUROS LIQUIDOS Y PETROLEO :

$$C_o = (0.388 + 0.00045 T)^{0.5} \quad (1.29)$$

donde:

$C_o$  = Calor específico de hidrocarburos líquidos y petróleo, Btu/lb-°F.

T = Temperatura, °F

d = Gravedad específica (agua = 1.0)

b) PARA HIDROCARBUROS GASEOSOS :

$$C_g = 4.0 + 1.30 n + 0.012 n T ; (n \geq 3) \quad (1.30)$$

donde:

$C_g$  = Calor específico de hidrocarburos gaseosos, Btu/lb-mol-°F.

n = Número de átomos de carbono por molécula.

T = Temperatura, °K

c) PARA AGUA SATURADA :

$$C_w = 1.0504 - (6.05 \times 10^{-4})T + (1.79 \times 10^{-6})T^2 \quad (1.31)$$

donde:

$C_w$  = Calor específico del agua saturada, Btu/lb-°F

T = Temperatura, °F ( $T \leq 500^\circ\text{F}$ )

BIBLIOTECA



FACULTAD DE CIENCIAS  
EN CIENCIAS QUÍMICAS

d) PARA ROCAS :

$$C_R = 0.18 + 0.00006 T \quad (1.32)$$

donde:

$C_R$  = Calor específico de la roca, Btu/lb-°F

$T$  = Temperatura, °F.

### 1.2.6 CAPACIDAD GALORIFICA DE ROCAS SATURADAS

La capacidad calorífica por unidad de volumen total (sólido y líquido) de un medio poroso, está dado por :

$$M = \frac{C_C}{V_T} = \frac{V_P}{V_T} \cdot \frac{V_F}{V_P} \cdot \frac{m}{V_F} \cdot \frac{C_C}{m} = \phi \cdot s \cdot \rho \cdot c$$



BIBLIOTECA FICT

ESPOL

Por tanto, la capacidad calorífica por unidad de volumen de una roca saturada con petróleo, agua y gas representa la cantidad de calor requerida para aumentar en 1°F la cantidad de petróleo, agua, gas y parte sólida contenida en 1 pie<sup>3</sup> de roca, por tanto:

$$M = \phi(S_O \rho_O C_O + S_W \rho_W C_W + S_g \rho_g C_g) + (1 - \phi)\rho_R \cdot C_R \quad (1.34)$$

donde:

$M$  = Capacidad calorífica por unidad de volumen,  $\text{Btu}/\text{pie}^3 - ^\circ\text{F}$ .

$\phi$  = Porosidad, fracción.

$S$  = Saturación inicial de fluido, fracción.

$\rho$  = Densidad,  $\text{lb}/\text{pie}^3$

$C$  = Calor específico,  $\text{Btu}/\text{lb} - ^\circ\text{F}$ .

$o, w, g, r$  = Subíndices referentes a petróleo, agua, gas y roca respectivamente.

### 1.2.7 CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LIQUIDOS Y GASES

Se refiere a la facilidad con la cual una sustancia permite el flujo de calor a través de ella.

#### a) PARA LIQUIDOS :

La conductividad térmica de líquidos varía entre 0.05 y 0.2  $\text{Btu}/\text{hr}\text{-pie}\text{-}^\circ\text{F}$  y normalmente su valor disminuye con aumento de temperatura. Para estimar conductividad térmica de líquidos se puede utilizar una de las siguientes ecuaciones:

$$K = 0.5778 \left[ 0.0984 + 0.109 (1.0 - T/T_b) \right] \quad (1.35)$$

$$K = 41.2 C_p (d^{1.33} / \gamma^{1.33}) (T_b/L_v) \quad (1.36)$$

donde:

K = Conductividad térmica de líquidos,  
Btu/hr-pie-°F.

T = Temperatura, °K.

T<sub>b</sub> = Temperatura de ebullición. °K.

C<sub>p</sub> = Calor específico, Btu/lb-°F.

d = Gravedad específica, adimensional.  
(d = 1.0 para agua)

γ = Peso molecular, lbs/mol

L<sub>v</sub> = Calor latente de vaporización  
Btu/lb.



b) PARA FRACCIONES DE PETROLEO Y MEZCLAS DE  
HIDROCARBUROS EN GENERAL :

Para estimar la conductividad térmica de fracciones de petróleo y mezclas de hidrocarburos en general, Cragde recomienda usar la siguiente relación:

$$K = 0.0677 \left[ 1.0 - 0.0003 (T-32) \right] / d \quad (1.37)$$

donde:

$K$  = Conductividad térmica de fracciones de petróleo y mezclas de hidrocarburos en general, Btu/hr-pie-°F.

$T$  = Temperatura, °F.

$d$  = Gravedad específica, adimensional.

c) PARA GASES :

A condiciones ordinarias de presión y temperatura, la conductividad térmica de gases varía entre 0.002 y 0.025 Btu/hr-pie-°F, siendo 0.007 a 0.008 un buen promedio.

En general, la conductividad térmica de gases, aumenta con aumento de temperatura, y se puede estimar mediante la ecuación de Gambill:

$$K = u_G(C_p + 2.48/\gamma) \quad (1.38)$$

donde:

$K$  = Conductividad térmica de gases, Btu/hr-pie-°F.

$u_G$  = Viscosidad del gas, lb/pie-hr  
(1  $C_p$  = 2.4191 lb/pie-hr)

$C_p$  y  $\gamma$  = Definidos anteriormente.

d) PARA VAPOR :

Para estimar la conductividad térmica de vapor a altas temperaturas Vargaftik y Zimina recomiendan la siguiente ecuación :

$$K = 0.5778 \times 10^{-4} (176 + 0.587 T + 1.04 \times 10^{-3} T^2 - 4.51 \times 10^{-7} T^3) \quad (1.39)$$

donde:

K = Conductividad térmica de vapor a alta temperatura, Btu/hr-pie-°F.

T = Temperatura, °C

#### 1.2.8 CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ROCAS



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

La conductividad térmica de rocas saturadas es una propiedad difícil de medir porque depende de un gran número de factores, se ha observado que disminuye con temperatura mientras que aumenta con saturación de agua, densidad de la roca, presión y conductividad térmica del fluido saturante.



Para estimar la conductividad térmica de rocas saturadas se recomiendan las siguientes ecuaciones :

a) ECUACION DE TIKHOMIROV :

Considera el efecto de temperatura:

$$K_T = 0.047 K_{20}^{4.98} T^{(0.17 \log T - 1.61 \log K_{20} + 0.12)} \quad (1.40)$$

donde:

$K_T$  = Conductividad térmica de la roca saturada a cualquier temperatura T, mlcal/seg-cm-°C.

(Para convertir de mlcal/seg-cm-°C a Btu/hr-pie-°F, multiplicar por 0.24175).

$K_{20}$  = Conductividad térmica a 20°C, mlcal/seg-cm-°C.

Este valor puede ser calculado usando la siguiente relación sugerida por Tikhomirov :

$$K_{20} = e^{(\rho - 1.60)/1.53} \quad (1.41)$$

donde :

$\rho$  = Densidad de la roca, g/cm<sup>3</sup>.

BIBLIOTECA



FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA

T = Temperatura, °K  
 (°K = °C + 273.1)

b) ECUACION DE ASAAD :

Considera el efecto de saturación de fluido y tipo de roca :

$$K = K_1 \left[ \frac{K_2}{K_1} \right]^m \quad (1.42)$$

donde:

K = Conductividad térmica de la roca saturada, Btu/hr-pie-°F.

K<sub>1</sub> = Conductividad térmica de la roca seca, Btu/hr-pie-°F.

K<sub>2</sub> = Conductividad térmica del fluido saturante, Btu/hr-pie-°F.

$$m \approx c \phi \quad (1.43)$$

$\phi$  = Porosidad, fracción

C = Factor de correlación que depende del tipo de roca, según tabla II mostrada a continuación :



BIBLIOTECA FIC1

ESPOL

R O C A S	$\phi$	$K_1$ (Btu/hr-pie-°F)	C
Arenisca	0.196	5.7	2.3
Arenisca	0.40	2.2	1.0
Arena Limosa	0.43	2.3	0.9
Limolita	0.36	2.2	1.1
Caliza	0.186	4.8	1.7
Arena (grano fino)	0.38	5.4	1.2
Arena (grano grueso)	0.34	5.4	1.2

TABLA II VALORES DE CORRELACION CALCULADOS SEGUN ASAAD

## c) ECUACION DE TIKHOMIROV :

Considera el efecto combinado de densidad, saturación de fluidos y temperatura.

$$K(S_w, T) = \frac{26.31}{T^{0.55}} e^{(0.6\rho_r + 0.6S_w)} \quad (1.44)$$

donde:

$K(S_w, T)$  = Conductividad térmica de roca par

cialmente saturada con agua ( $S_w$ ) a la temperatura  $T$ , mcal/seg-cm-°C.

$T$  = Temperatura, °K.

$\rho_r$  = Densidad de la roca, g/cm<sup>3</sup>.

$S_w$  = Saturación de agua a la temperatura  $T$ , fracción.

Este valor se calcula usando la ecuación :

$$S_w = S_{wi} (1 + \alpha_w (T - T_i)) \quad (1.45)$$

donde :

$S_{wi}$  = Saturación de agua inicial, fracción.

$\alpha_w$  = Coeficiente de expansión volumétrica del agua, 1/°F.

$T_i$  = Temperatura inicial a la cual tengo  $S_{wi}$ , °F.

### 1.2.9 DIFUSIVIDAD TERMICA DE ROCAS SATURADAS :

En la mayoría de las ecuaciones de transferencia de calor se utiliza más comúnmente el término de difusividad térmica, que el de conduc

BIBLIOTECA



FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

tividad térmica.

Por tanto, la difusividad térmica de rocas saturadas se define como: la razón entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica por unidad de volumen de las rocas saturadas, la que está dado por :

$$D = \frac{K}{M} \quad (1.46)$$

donde:

$$D = \text{pie}^2/\text{hr}$$

$$K = \text{Btu/hr-pie-}^\circ\text{F}$$

$$M = \text{Btu/pie}^3 - ^\circ\text{F}$$

#### 1.2.10 PERMEABILIDAD RELATIVA A TRES FASES.

En la predicción del comportamiento de yacimientos sometidos a procesos de recuperación térmica, se requiere tener datos de permeabilidades relativas. Estos datos deben ser determinados en el laboratorio, sin embargo en ausencia de datos experimentales, se pueden utilizar ecuaciones empíricas.

Una de tales ecuaciones son las presentadas por NAAR - Henderson :

$$K_{rw} = (S_w - S_{wr}) / (1 - S_{wr})^4 \quad (1.47)$$

$$K_{ro} = S_o^3 (1 - S_g + S_w - 2 S_{wr}) / (1 - S_{wr})^4 \quad (1.48)$$

$$K_{rg} = S_g^3 (2 - S_g - 2 S_{wr}) / (1 - S_{wr})^4 \quad (1.49)$$

donde:

$S_{or}, S_{wr}$  y  $S_{gr}$  = Saturaciones residuales de petróleo, agua y gas, fracciones.

Estos valores deben conocerse.

En general, la permeabilidad absoluta y relativa pueden variar con temperatura, sin embargo se dispone de pocos datos al respecto.

Las propiedades térmicas de las rocas antes mencionadas pueden ser resumidas en la siguiente Tabla III.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

ROCAS	DENSIDAD lb/pie <sup>3</sup>	CALOR ESPECIFICO Btu/lb-°F	CONDUCTIVIDAD TERMICA Btu/hr-pie-°F	DIFUSIVIDAD TERMICA pie <sup>2</sup> /hr
ROCAS SECAS :				
Arenisca	130	0.183	0.507	0.0213
Arena limosa	119	0.202	(0.40)	(0.0167)
Limolita	120	0.204	0.396	0.0162
Lutita	145	0.192	0.603	0.0216
Caliza	137	0.202	0.983	0.0355
Arena (grano fino)	102	0.183	0.362	0.0194
Arena (grano grueso)	109	0.183	0.322	0.0161
ROCAS SATURADAS CON AGUA :				
Arenisca	142	0.252	1.592	0.0445
Arena Limosa	132	0.288	(1.50)	(0.0394)
Limolita	132	0.276	(1.51)	(0.0414)
Lutita	149	0.213	0.975	0.0307
Caliza	149	0.266	2.050	0.0517
Arena (grano fino)	126	0.339	1.590	0.0372
Arena (grano grueso)	130	0.315	1.775	0.0433
* Los valores entre paréntesis son aproximados				

TABLA III DENSIDAD, CALOR ESPECIFICO, CONDUCTIVIDAD TERMICA Y DIFUSIVIDAD TERMICA DE ROCAS SELECCIONADAS

(Tomado del trabajo de Somerton)



### 1.3 PERDIDAS DE CALOR DURANTE LA TRANSMISION DE FLUIDOS CALIENTES.

Debido a la diferencia de temperaturas existentes entre el vapor y el medio ambiente que rodea las líneas de superficie, tubería de inyección en el pozo y la formación de interés, parte del contenido de calor del vapor se pierde antes de llegar al frente de calentamiento de la formación, es por esto que es importante cuantificar la cantidad de calor a perderse y tratar de reducir estas pérdidas a un valor mínimo.

El objetivo de esta sección es analizar las pérdidas de calor en :

- a) Superficie
- b) Pozo
- c) Formación

Tal como se muestra en la Fig. N° 1.5.

Hay que anotar que los resultados del análisis de pérdidas de calor en superficie, pozo y formación, serán utilizados en la elaboración de programas computacionales de mucha utilidad en proyectos de inyección continua de vapor.

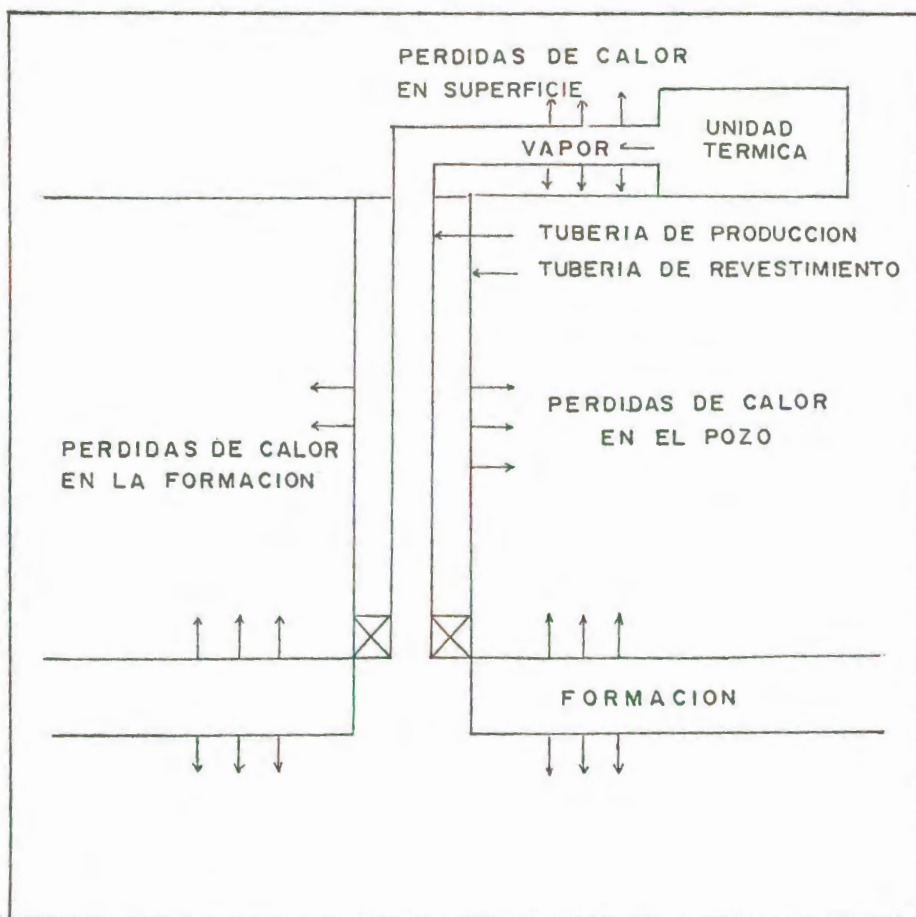


Fig. Nº 1.5 ESQUEMA DE UN POZO SOMETIDO A INYECCION CONTINUA DE VAPOR

Antes de seguir con el desarrollo central de esta sección, es necesario revisar algunas ideas básicas sobre los mecanismos de transferencia de calor en una formación petrolífera sometida a inyección continua de vapor.

### 1.3.1 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR :

Calor es la energía que se transfiere como resultado de una diferencia o gradiente de temperatura. Los mecanismos básicos de transferencia de calor en una formación petrolífera sometida a inyección continua de vapor, son :

- Conducción
- Radiación
- Convección

#### a) CONDUCCION :

1ra. Definición: Es la transferencia de calor de una parte de un cuerpo a alta temperatura, a otra parte del mismo cuerpo a menor temperatura.

2da. Definición: Es la transferencia de calor de un cuerpo a alta temperatura a otro cuerpo a menor temperatura, en contacto físico con el



Con respecto a la segunda definición y considerando un sistema radial :

Si las temperaturas de los cuerpos no cambian con tiempo quiere decir que el flujo de calor tampoco cambiará con tiempo, por lo que el proceso ocurre bajo condiciones de flujo continuo la que estará descrito macroscópicamente por la siguiente ecuación de Fourier:

$$q_u = - K A \frac{\partial T}{\partial r} \quad (1.50)$$

donde :

$q_u$  = Tasa de flujo de calor por conducción, considerando flujo continuo, Btu/hr.

A = Area a través de la cual ocurre el flujo, pies<sup>2</sup>.

K = Conductividad térmica de la sustancia, Btu/hr-pie-°F.

$\partial T/\partial r$  = Gradiente de temperatura en la dirección r, que no cambia con tiempo, °F/pie.

La relación anterior se aplica para conducción radial en sólidos, líquidos y gases.

Si las temperaturas en los cuerpos varía con tiempo quiere decir que el flujo de calor también variará con tiempo, por lo que el proceso ocurre bajo condiciones de flujo no continuo y en donde la ecuación anterior de Fourier se aplicará solamente para un tiempo dado en que la distribución de temperatura sea conocida, es decir :

$$(q_u)_t = - K \cdot A \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_t \quad (1.51)$$

donde:

$(q_u)_t$  = Tasa de flujo de calor por conducción, considerando flujo no continuo, Btu/hr.

A = Area a través de la cual ocurre el flujo, pies<sup>2</sup>.

K = Conductividad térmica de la sustancia, Btu/hr-pie-°F.

$(\partial T / \partial r)_t$  = Gradiente de temperatura en la dirección r, que varía con tiempo, °F/pie.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## b) RADIACION :

Es radiación electromagnética emitida por un cuerpo en virtud de su temperatura.

La relación que describe este tipo de transferencia de calor, está dada por :

$$q_r = h_r \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.52)$$

donde:

$q_r$  = Tasa de flujo de calor por radiación, Btu/hr.

$A$  = Area a través de la cual ocurre el flujo, pies<sup>2</sup>.

$T_1$  = Temperatura del cuerpo a mayor temperatura, °F.

$T_2$  = Temperatura del cuerpo a menor temperatura, °F.

$h_r$  = Coeficiente de transferencia de calor por radiación, Btu/hr-pie<sup>2</sup>-°F; está definida por la ecuación de Stefan-Boltzman dada por :



$$h_r = 0.1714 \times 10^{-8} F_e \cdot F_f \cdot \left[ (T_2 + 460)^2 + (T_1 + 460)^2 \right] \cdot (T_1 + 460 + T_2 + 460) \quad (1.53)$$

donde:

$0.1714 \times 10^{-8}$  = Constante de Stefan-Boltzman.

$F_e$  = Factor de emisividad, el cual depende de la naturaleza de los cuerpos, adimensional.

$F_f$  = Factor de forma, el cual depende de la geometría de los cuerpos y relaciona la radiación emitida por 1 cuerpo y la que es interceptada por el otro cuerpo y viceversa, adimensional.

$T_1 > T_2$  = Definidos anteriormente.

### c) CONVECCION :

Es la transferencia de calor desde una superficie hacia un fluido en movimiento en contacto con ella o viceversa.

También se considera la convección como la transferencia de calor de una parte de un fluido en movimiento a mayor temperatura



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DEL ECUADOR  
ESPOL



hacia otra parte del mismo a menor temperatura.

#### CONVECCION FORZADA :

Se genera si el movimiento del fluido se debe a la aplicación de alguna fuerza (bomba, abanico, etc.).

#### CONVECCION LIBRE :

Se genera cuando el fluido se mueve por diferencia de densidades, debido a diferencias de temperaturas.

En los dos casos anteriores la transferencia de calor viene dada por la Ley de Enfriamiento de Newton :

$$q_c = h_c \cdot A \cdot |T_f - T_s| \quad (1.54)$$

donde:

$q_c$  = Tasa de flujo de calor por convección, Btu/hr.

$A$  = Area a través de la cual ocurre el flujo de calor, pies<sup>2</sup>.

$h_c$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección, Btu/hr-pie<sup>2</sup>- °F.

$T_f$  = Temperatura del fluido, °F.

$T_s$  = Temperatura de la superficie, °F.

$|T_f - T_s|$  = Se toma valor absoluto para tomar en cuenta flujo de calor del fluido hacia la superficie o de la superficie hacia el fluido, según  $T_f$  sea mayor o menor que  $T_s$ .

### 1.3.2 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL.

Es común encontrar los tres mecanismos de transferencia de calor anteriormente discutidos, actuando simultáneamente en sistemas formados por diferentes cuerpos y materiales, en este caso es conveniente definir un coeficiente de transferencia de calor total en la ecuación:

$$q = h \cdot A_c \cdot \Delta T \quad (1.55)$$

donde:

$q$  = Tasa de flujo de calor total, Btu/hr

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor total, Btu/hr-pie<sup>2</sup>- °F.



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

$A_c$  = Area característica (o referencial) del sistema, pie<sup>2</sup>.

$\Delta T$  = Caída de temperatura total del sistema, °F.

En esta tesis, el análisis de flujo de calor se orientará hacia sistemas con geometría radial, por tal motivo se presentan a continuación los procedimientos para determinar las pérdidas de calor en la tubería superficial, hoyo del pozo y formación de interés.

### 1.3.3 PERDIDAS DE CALOR EN LINEAS DE SUPERFICIE

El análisis de pérdidas de calor en la tubería superficial incluye los 3 mecanismos básicos de transferencia de calor a saber: conducción, radiación y convección.

Antes de proceder a establecer las pérdidas de calor en la tubería superficial será necesario considerar 2 casos :

- a) Tubería superficial desnuda.
- b) Tubería superficial aislada.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## a) TUBERIA SUPERFICIAL DESNUDA :

Si se considera una tubería superficial de acero no aislada que transporta vapor de inyección, en un medio ambiente exterior a la tubería constituido por aire, en este sistema se presentarán los siguientes mecanismos de transferencia de calor :

- CONVECCION INTERNA : Entre el vapor y la superficie interna de la tubería superficial, necesariamente es forzada.
- CONDUCCION : A través de la pared de la tubería superficial.
- RADIACION : Entre la superficie exterior de la tubería superficial desnuda y la atmósfera.
- CONVECCION EXTERNA : Entre la superficie exterior de la tubería superficial desnuda y la atmósfera. Puede ser libre o forzada dependiendo del viento.



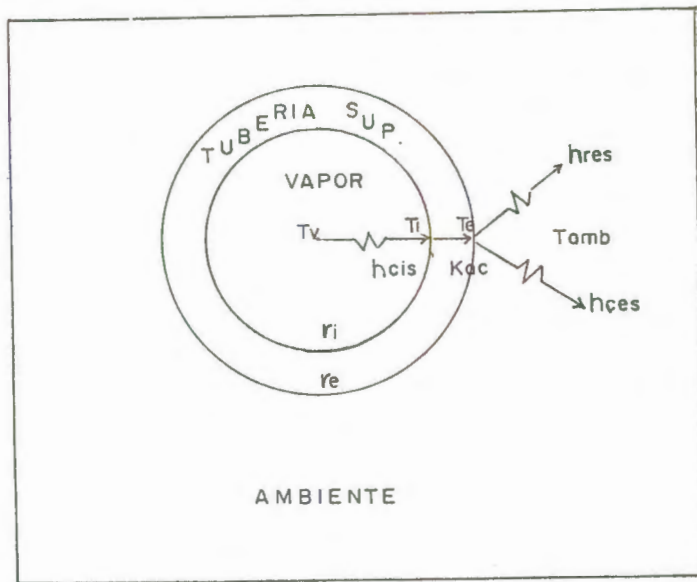


Fig. N° 1.6 TRANSFERENCIA DE CALOR EN TUBERIA SUPERFICIAL DESNUDA

PERDIDAS DE CALOR :

Las pérdidas de calor en la tubería superficial desnuda puede calcularse de acuerdo a la ecuación :

$$q_s = h_s \cdot A_{es} \cdot (T_v - T_{amb}) \quad (1.56)$$

donde:

$q_s$  = Tasa de pérdidas de calor total en la tubería superficial desnuda, Btu/hr.

$h_s$  = Coeficiente de transferencia de calor total a través de la tubería superficial desnuda y referida al área exte-

rior del mismo, Btu/hr-pie<sup>2</sup> - °F.

La forma de calcular este valor se discutirá posteriormente.

$A_{es}$  = Area exterior total de la tubería superficial desnuda expuesta al flujo de calor, pie<sup>2</sup>.

Este valor está dado por :

$$A_{es} = 2\pi \cdot r_e \cdot L \quad (1.57)$$

donde:

$r_e$  = Radio exterior de la tubería superficial, pies.

$L$  = Longitud total de la tubería superficial, pies.

$T_v$  = Temperatura del vapor, °F.

$T_{amb}$  = Temperatura del medio ambiente donde se encuentra la tubería superficial desnuda, °F.

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL:

La expresión para el coeficiente de transferencia de calor total a través de la tubería



BIBLIOTECA  
ESPOL

bería superficial desnuda y referida al área exterior de la misma está dada por :

$$h_s = \left[ \frac{r_e}{r_i \cdot h_{cis}} + \frac{r_e \ln(r_e/r_i)}{K_{ac}} + \frac{1}{(h_{ces} + h_{res})} \right]^{-1} \quad (1.58)$$

donde:

$r_e$  = Radio exterior de la tubería superficial, pie.

$r_i$  = Radio interior de la tubería superficial, pie.

$h_{cis}$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección interna en la tubería superficial, Btu/hr-pie<sup>2</sup> - °F.

Este coeficiente en vapor húmedo varía de 200 a 2,000 pero en la práctica se considera buena aproximación 300 Btu/hr-pie<sup>2</sup> - °F.

$K_{ac}$  = Conductividad térmica del acero con que está construída la tubería, Btu/hr-pie-°F.

$h_{res}$  = Coeficiente de transferencia de calor por radiación de la superficie

BIBLIOTECA



FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL



exterior de la tubería superficial desnuda, Btu/hr-pie<sup>2</sup> - °F.

Este valor está dado por :

$$h_{res} = 0.1714 \times 10^{-8} F_e F_f \left[ (T_{amb} + 460)^2 + (T_e + 460)^2 \right] \cdot (T_e + 460 + T_{amb} + 460) \quad (1.59)$$

donde:

$F_e$  = Factor de emisividad de la superficie exterior de la tubería superficial desnuda, adimensional.

$F_f$  = Factor de forma de la tubería superficial desnuda, en la práctica se asume igual a la unidad, adimensional.

$T_{amb}$  = Temperatura ambiente, °F.

$T_e$  = Temperatura de la superficie exterior de la tubería superficial desnuda, °F.

$h_{ces}$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección externa en la tubería superficial desnuda, Btu/hr-pie<sup>2</sup> - °F.

Depende de la presión y temperatura en el medio ambiente, además depende de si existe o no viento en el ambiente exterior o sea de si existe convección forzada o libre.

Mediante análisis dimensional y experimentación se han desarrollado las siguientes expresiones para calcular  $h_{ces}$ :

- PARA CONVECCION LIBRE :

(Velocidad del viento = cero millas/hora)

$$h_{ces} = 0.53 \frac{K_a}{D_e} \left[ D_e^3 (T_e - T_{amb}) \frac{g \cdot B_a \cdot (C_p)_a \cdot u_a}{(u_c)_a^2 K_a} \right]^{1/4} \quad (1.60)$$

donde:

$K_a, B_a, (u_c)_a, (c_p)_a, u_a$  = Conductividad térmica, coeficiente de expansión volumétrica, viscosidad cinemática, calor específico a presión constante, viscosidad dinámica del aire, expresado en : Btu/hr-pie-°F, pie<sup>3</sup>/pie<sup>3</sup>-°F, pie<sup>2</sup>/hr, Btu/lb-°F, (lb/pie-hr = 2.42 x  $u_a$  en centipoises).

$D_e$  = Diámetro exterior de la tubería superficial desnuda, pie.

$g$  = Constante de gravedad:  $4.17 \times 10^8$  pie/hr<sup>2</sup>

$T_e, T_{amb}$  = Definidos anteriormente.

- PARA CONVECCION FORZADA :

(Velocidad del viento  $\neq$  cero millas/hora)

- Si  $1,000 \leq 8,800 D_e V \leq 50,000$  ; entonces:

$$h_{ces} = 19.3 (C_p)_a \frac{(\rho_a V)^{0.6}}{D_e^{0.4}} \quad (1.61)$$

- Si  $8,800 D_e V > 50,000$  ; entonces :

$$h_{ces} = 0.0239 \frac{K_a^{0.805}}{D_e} \left( \frac{5,280 \rho_a V D_e}{u_a} \right) \quad (1.62)$$

donde:

$\rho_a$  = Densidad del aire, lb/pie<sup>3</sup>.

$V$  = Velocidad del viento, millas/hr

$D_e, (C_p)_a, K_a, u_a$  = Definidas anteriormente.

BIBLIOTECA



FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Las propiedades físicas del aire requeridas en las ecuaciones (1.60), (1.61) y (1.62), se pueden estimar en función de presión atmosférica (14.7 psia) y temperatura ambiente en el rango de 0° a 1,000°F, mediante las siguientes ecuaciones :

$$K_a = 0.01328 + 2.471 \times 10^{-5} T_{amb} - 4.247 \times 10^{-9} T_{amb}^2 \quad (1.63)$$

$$\rho_a = 0.0771 - 8.848 \times 10^{-5} T_{amb} + 3.744 \times 10^{-8} T_{amb}^2 \quad (1.64)$$

$$u_a = 0.0400 + 6.155 \times 10^{-5} T_{amb} - 1.220 \times 10^{-8} T_{amb}^2 \quad (1.65)$$

$$(C_p)_a = 0.2382 + 1.390 \times 10^{-5} T_{amb} + 1.027 \times 10^{-8} T_{amb}^2 \quad (1.66)$$

$$B_a = 0.0024 - 9.757 \times 10^{-5} T_{amb} + 0.169 \times 10^{-7} T_{amb}^2 - 0.148 \times 10^{-10} T_{amb}^3 \quad (1.67)$$

La variable  $B_a$  es válida solamente en el rango de temperaturas de 0° a 500°F.

## b) TUBERIA SUPERFICIAL AISLADA :

Si se considera una tubería superficial de acero aislada que transporta vapor, en un medio ambiente exterior a la tubería constituido por aire, en este sistema se presentarán los siguientes mecanismos de transferencia de calor :

- Convección Interna : Entre el vapor y la superficie interna de la tubería superficial. Necesariamente es forzada.
- Conducción : A través de la tubería superficial.
- Conducción : A través del aislante.
- Radiación : Entre la superficie exterior del aislante y la atmósfera.
- Convección externa: Entre la superficie exterior del aislante y la atmósfera. Puede ser libre o forzada dependiendo del viento.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

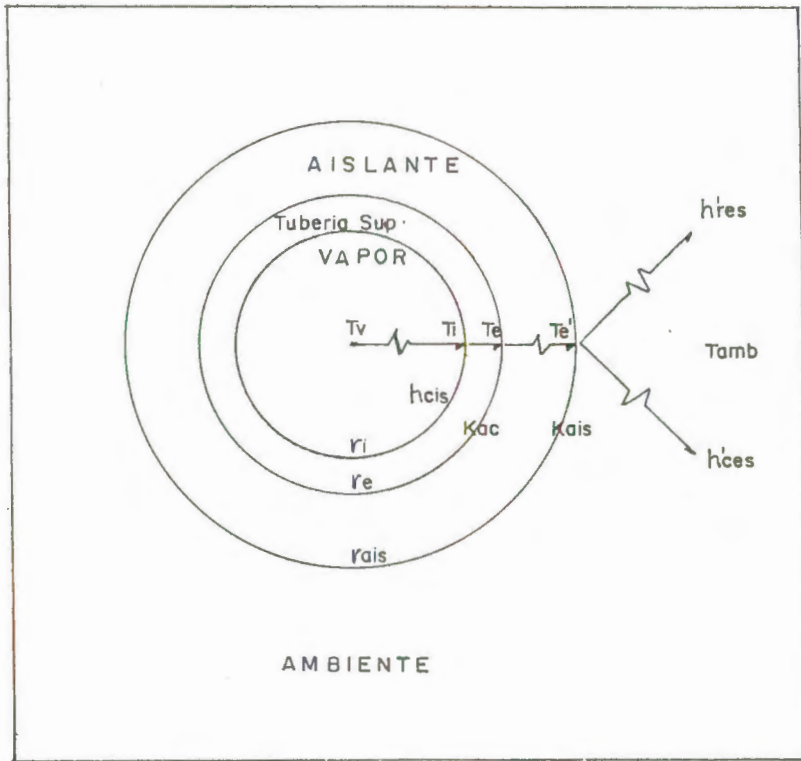


Fig. N° 1.7 TRANSFERENCIA DE CALOR EN TUBERIA SUPERFICIAL AISLADA

PERDIDAS DE CALOR :

Las pérdidas de calor en la tubería superficial aislada puede calcularse de acuerdo a la ecuación :

$$q'_s = h'_s \cdot A'_{es} \cdot (T_v - T_{amb}) \quad (1.68)$$

donde:

$q'_s, h'_s$  = Definidas anteriormente pero referidas a tubería superficial aislada.

$A'_{es}$  = Area exterior total de la tubería superficial aislada expuesta al flujo de calor, pie<sup>2</sup>.

Este valor está dado por :

$$A'_{es} = 2 \pi r_{ais} L \quad (1.69)$$

donde:

$r_{ais}$  = Radio del aislante, pie.

#### COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL:

La expresión para el coeficiente de transferencia de calor total a través de la tubería superficial aislada y referida al área exterior de la misma, está dada por :

$$h'_s = \left[ \frac{r_{ais}}{r_i h'_{cis}} + \frac{r_{ais} \ln(r_e/r_i)}{K_{ac}} + \frac{r_{ais} \ln(r_{ais}/r_e)}{K_{ais}} + \frac{1}{h'_{ces} + h'_{res}} \right]^{-1}$$

donde:

$r_{ais}$  = Radio del aislante, pie.



(170)  
BIBLIOTECA FICTICIA  
ESPOL



$K_{ais}$  = Conductividad térmica del material aislante, Btu/hr-pie-°F .

Este valor depende de la naturaleza del material aislante, alguno de los más usados son :

-magnesio ( $K_{ais} \approx 0.034$  a  $0.04$  Btu/hr-pie-°F)

-corcho ( $K_{ais} \approx 0.025$  Btu/hr-pie-°F), y

-fibra ( $K_{ais} \approx 0.028$  Btu/hr-pie-°F)

$h'_{res}$  = Definida anteriormente, pero referida a tubería superficial aislada.

Este valor está dado por :

$$h'_{res} = 0.1714 \times 10^{-8} F'_e \cdot F'_f \left[ (T_{amb} + 460)^2 + (T'_e + 460)^2 \right] \cdot (T'_e + 460 + T_{amb} + 460)$$

donde :

$F'_e$ ,  $F'_f$ ,  $T'_e$  = Definidas anteriormente referidas a tubería superficial aislada.



BIBLIOTECA FICT

ESPOL

$h'_{ces}$  = Definida anteriormente pero referida a tubería superficial aislada.

Este valor está dado por :

-PARA CONVECCION LIBRE:

$$h'_{ces} = 0.53 \frac{K_a}{D'_e} \left[ (D'_e)^3 (T'_e - T_{amb}) \frac{g \cdot B_a \cdot (C_p)_a \cdot u_a}{(u_c)_a^2 K_a} \right]^{1/4} \quad (1.72)$$

donde:

$D'_e, T'_e$  = Definidas anteriormente pero referidas a tubería superficial aislada.

-PARA CONVECCION FORZADA :

-Si  $1,000 \leq 8,800 D'_e \cdot V \leq 50,000$  ; entonces :

$$h'_{ces} = 19.3 (C_p)_a \frac{(\rho_a \cdot V)^{0.6}}{(D'_e)^{0.4}}$$



BIBLIOTECA FICP

-Si  $8,800 D'_e \cdot V > 50,000$  ; entonces : **ESPOL**

$$h'_{ces} = 0.0239 \frac{K_a}{D'_e} \left( \frac{5,280 \cdot \rho_a \cdot V \cdot D'_e}{u_a} \right)^{0.805} \quad (1.74)$$

donde:

$D'_e$  = Definida anteriormente pero referida a tubería superficial aislada.

(El resto de variables fueron definidas anteriormente).

#### 1.3.4 CALCULO DE LA CALIDAD DEL VAPOR EN EL CABEZAL DEL POZO Y EN LA CARA DE LA ARENA.

##### a) CALIDAD DEL VAPOR EN EL CABEZAL DEL POZO:

Con el fin de determinar la calidad del vapor en el cabezal del pozo se puede aplicar en el sistema generador-cabezal del pozo el siguiente balance :

Cantidad de calor a la salida del generador por unidad de tiempo	=	Cantidad de calor en el cabezal del pozo por unidad de tiempo	+	Pérdidas de calor en la tubería superficial por unidad de tiempo
--	---	---	---	--

$$q_{GEN} = q_{WH} + q_S \quad (1.75)$$

$$m_t (h_{as} + X_{GEN} L_V) = m_t (h_{as} + X_{WH} L_V) + q_S$$

$$h_{as} + X_{GEN} L_V = h_{as} + X_{WH} L_V + q_S/m_t$$

$$h_{as} + X_{GEN} L_V - h_{as} - \frac{q_S}{m_t} = X_{WH} L_V$$

$$X_{WH} = X_{GEN} - \frac{q_S}{m_t L_V} \quad (1.76)$$

donde:

$X_{WH}$  = Calidad del vapor en el cabezal del pozo, adimensional.

$X_{GEN}$  = Calidad del vapor a la salida del generador, adimensional.

$q_S$  = Pérdidas de calor en la tubería superficial por unidad de tiempo, Btu/hr.

$m_t$  = Tasa másica de inyección de vapor, lbs/hr

$L_V$  = Calor latente del vapor a una presión de saturación de vapor constante, Btu/lb.



BIBLIOTECA FIC I  
ESPOL

En el balance anterior se ha considerado constantes las propiedades térmicas del a-

agua y vapor es decir se ha considerado que la presión de saturación del vapor a través del sistema generador-cabezal del pozo permanece constante, por tanto si en la tubería superficial se cumple que :

$(\Delta P)_S = 0$  ; entonces el balance asumirá una presión de saturación de vapor constante y equivalente a :

$$P_S = P_{GEN} = P_{WH} \quad (1.77)$$

$(\Delta P)_S \neq 0$  ; entonces el balance asumirá una presión de saturación de vapor constante y equivalente a :

$$P_S = \frac{P_{GEN} + P_{WH}}{2} \quad (1.78)$$

donde:

$(\Delta P)_S$  = Caída de presión en la tubería superficial, psia.



Este valor está dado por :

**BIBLIOTECA FIC I  
ESPOL**

$$(\Delta P)_S = P_{WH} - P_{GEN} \quad (1.79)$$

donde:

$P_S$  = Presión de saturación del vapor, psia.

$P_{GEN}$  = Presión a la salida del generador,  
psia.

$P_{WH}$  = Presión en el cabezal del pozo, psia.

b) CALIDAD DEL VAPOR EN LA CARA DE LA ARENA :

Con el fin de determinar la calidad del vapor en la cara de la arena se puede aplicar en el sistema cabezal del pozo-cara de la arena el siguiente balance :

Cantidad de calor en el cabezal del pozo por unidad de tiempo	=	Cantidad de calor en la cara de la arena por unidad de tiempo	+	Pérdidas de calor en la tubería de producción por unidad de tiempo.
---	---	---	---	---

$$q_{WH} = q_F + q_P$$

$$m_t (h_{as} + X_{WH} L_V) = m_t (h_{as} + X_{CA} L_V) + q_P$$

$$h_{as} + X_{WH} L_V = h_{as} + X_{CA} L_V + q_P / m_t$$

$$h_{as} + X_{WH} L_V - h_{as} - \frac{q_P}{m_t} = X_{CA} L_V$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$X_F = X_{WH} - \frac{q_p}{m_t L_v} \quad (1.81)$$

donde:

$X_F$  = Calidad del vapor en la cara de la arena, adimensional.

$X_{WH}$  = Calidad del vapor en el cabezal del pozo, adimensional.

$q_p$  = Pérdidas de calor en la tubería de producción por unidad de tiempo, Btu/hr

$m_t$  = Tasa másica de inyección de vapor, lbs/hr.

$L_v$  = Calor latente del vapor a una presión de saturación de vapor constante, Btu/lb.

En el balance anterior se ha considerado constantes las propiedades térmicas del agua y vapor, es decir se ha considerado que la presión de saturación del vapor a través del sistema cabezal del pozo-cara de la arena permanece constante, por tanto si en la tubería de producción se cumple que :



$(\Delta P)_P = 0$  ; entonces el balance asumirá una presión de saturación de vapor constante y equivalente a :

$$P_S = P_{WH} = P_{CA} \quad (1.82)$$

$(\Delta P)_P \neq 0$  ; entonces el balance asumirá una presión de saturación de vapor constante y equivalente a :

$$P_S = \frac{P_{WH} + P_{CA}}{2} \quad (1.83)$$

donde:

$(\Delta P)_P$  = Caída de presión en la tubería de producción, psia.

Este valor está dado por :

$$(\Delta P)_P = P_F - P_{WH} \quad (1.84)$$

donde:

$P_S$  = Presión de saturación del vapor, psia

$P_{WH}$  = Presión en el cabezal del pozo

$P_F$  = Presión en la cara de la arena, psia.



ESPOL

### 1.3.5 PERDIDAS DE CALOR EN EL HOYO DEL POZO

Existen varios métodos para calcular las pérdidas de calor en un pozo acondicionado para la inyección de vapor, la mayoría de los cuales se basan en las siguientes suposiciones:

- a) El vapor se inyecta por la tubería de producción a temperatura, presión, tasa y calidad constantes.
- b) Dentro de la tubería de producción los cambios de energía cinética y potencial, así como las pérdidas por fricción son despreciables. Esta suposición implica que si el vapor no pierde calor suficiente para condensarse, la temperatura de la tubería de producción permanecerá constante a través de toda su longitud y será igual a la temperatura del vapor en la superficie.
- c) El gradiente geotérmico puede despreciarse y la temperatura de la tierra en el punto, puede considerarse igual a la temperatura ambiente más la mitad del aumento de temperatura a la formación de interés.

d) Las conductividades y difusividades térmicas de la tierra en la región que rodea al pozo, se consideran constantes.

### 1.3.6 METODO DE WILLHITE

De los métodos simplificados que sirven para estimar pérdidas de calor en un pozo de inyección de vapor y basado en las suposiciones anteriores, el método presentado por Willhite es posiblemente el más riguroso y de fácil aplicación.

Este método se fundamenta en el uso de un coeficiente de transferencia de calor total en el sistema formado por :

- Tubería de producción
- Aislante, en caso que exista
- Espacio anular
- Tubería de revestimiento
- El cemento, y
- Formación



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Este sistema junto a la correspondiente distribución de temperatura se muestra en Fig.Nº1.8.

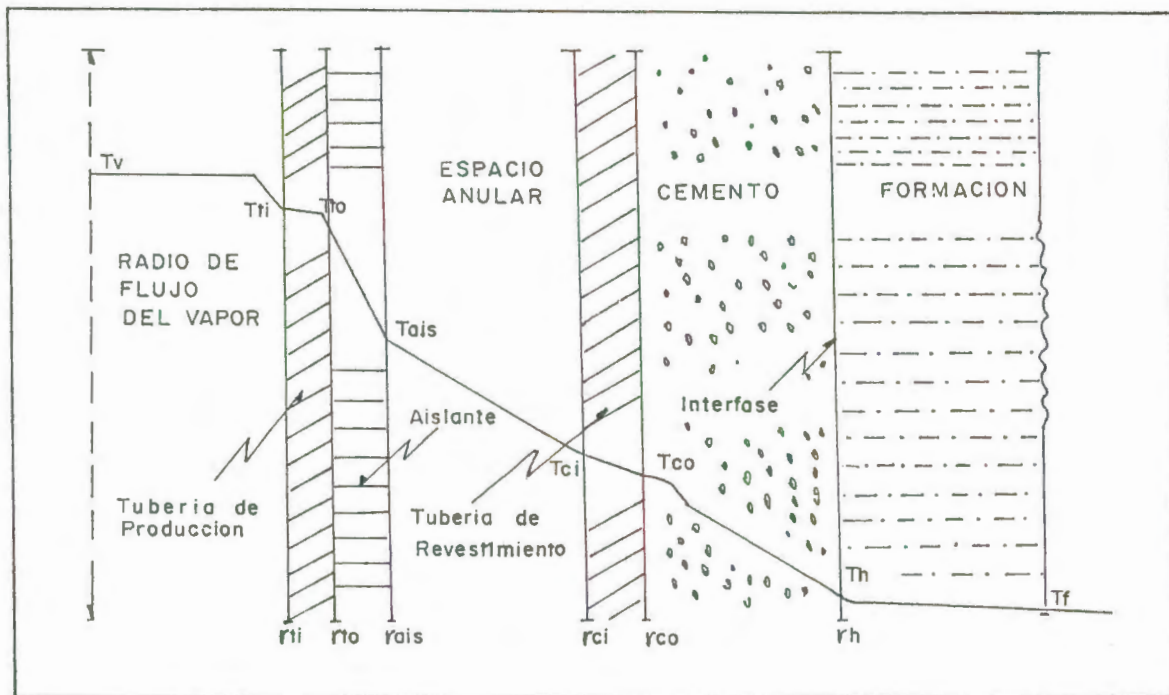


Fig. N° 1.8 VISTA TRANSVERSAL DE UN POZO DE INYECCION DE VAPOR Y SU DISTRIBUCION DE TEMPERATURA.

Antes de proceder a establecer las pérdidas de calor en un pozo de inyección de vapor será necesario considerar 2 casos:

- a) Pozo con tubería de producción desnuda
- b) Pozo con tubería de producción aislada.

a) POZO CON TUBERIA DE PRODUCCION DESNUDA :

Si se considera una tubería de producción hecha de acero no aislada, rodeada por espacio anular constituido por aire, tubería de revestimiento, cemento y formación, en este sistema se presentarán los siguientes mecanismos de transferencia de calor:

- CONVECCION INTERNA : Entre el vapor y la superficie interna de la tubería de producción. Necesariamente es forzada.
- CONDUCCION : A través de la pared de la tubería de producción.
- RADIACION : Entre la superficie exterior de la tubería de producción desnuda y la interna de la tubería de revestimiento.



BIBLIOTECA FICU  
ESPOL

- CONVECCION EXTERNA : En el espacio anular, limitado entre la superficie exterior de la tubería de producción desnuda y la interna de la tubería de revestimiento. Necesariamente es libre.
- CONDUCCION : A través de la tubería de revestimiento.
- CONDUCCION : A través del cemento.

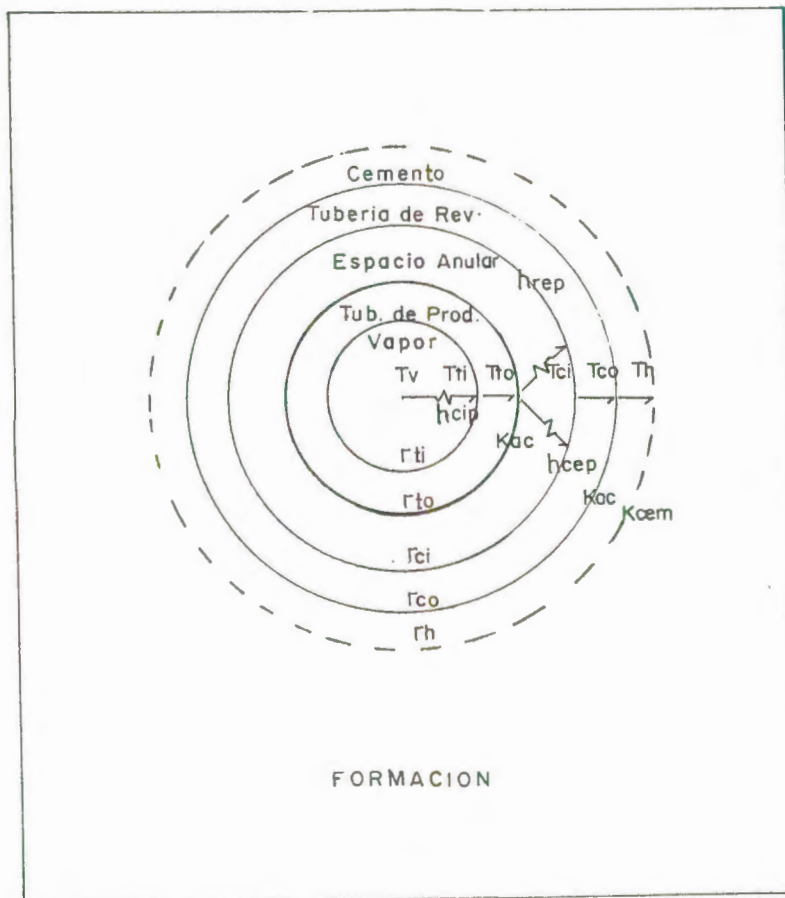


Fig. N° 1.9 TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN POZO CON TUBERIA DE PRODUCCION DESNUDA.

PERDIDAS DE CALOR :

Las pérdidas de calor total en el pozo con tubería de producción desnuda (es decir desde el interior de la tubería de producción hasta la interface cemento-formación), puede evaluarse mediante la ecuación :

$$q_p = h_p A_{ep} (T_v - T_h) \quad (1.85)$$

donde:

$q_p$  = Tasa de pérdidas de calor total en el pozo con tubería de producción desnuda, Btu/hr.

$h_p$  = Coeficiente de transferencia de calor total en el pozo con tubería de producción desnuda y referida al área exterior del mismo, Btu/hr-pie<sup>2</sup>

El cálculo de este valor se discutirá en detalle posteriormente.

$A_{ep}$  = Area exterior total de la tubería de producción desnuda expuesta al flujo de calor, pie<sup>2</sup>.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



Este valor está dado por :

$$A_{ep} = 2\pi r_{to} L_p \quad (1.86)$$

donde:

$r_{to}$  = Radio externo de la tubería de producción, pies.

$L_p$  = Profundidad del pozo, pies.

$T_v$  = Temperatura del vapor, °F.

$T_h$  = Temperatura en la interface cemento-formación.

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL:

La expresión para el coeficiente de transferencia de calor total en el pozo con tubería de producción desnuda y referida al área exterior del mismo, está dada por :

$$h_p = \left[ \frac{r_{to}}{r_{ti} h_{cip}} + \frac{r_{to} \ln(r_{to}/r_{ti})}{K_{ac}} + \frac{1}{(h_{cep} + h_{rep})} + \frac{r_{to} \ln(r_{co}/r_{ci})}{K_{ac}} + \frac{r_{to} \ln(r_h/r_{co})}{K_{cem}} \right]^{-1} \quad (1.87)$$

donde:

$r_{to}$  = Radio externo de la tubería de producción, pies.

$r_{ti}$  = Radio interno de la tubería de producción, pies.

$h_{cip}$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección interna en la tubería de producción desnuda, Btu/hr-pie<sup>2</sup> - °F.

Este valor para vapor húmedo varía entre 500 y 4,000, Btu/hr-pie<sup>2</sup> - °F.

$K_{ac}$  = Conductividad térmica del acero con que han sido construidas las tuberías de producción y revestimiento, Btu/hr-pie-°F.

$r_{co}$  = Radio externo de la tubería de revestimiento, pies.

$r_{ci}$  = Radio interno de la tubería de revestimiento, pies.

$r_h$  = Radio del hoyo del pozo, pies.

$K_{cem}$  = Conductividad térmica del cemento que es utilizado para pegar la tube-



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

ría de revestimiento al hoyo, Btu/hr-pie-°F.

$h_{rep}$  = Coeficiente de transferencia de calor por radiación de la superficie exterior de la tubería de producción desnuda, Btu/hr-pie<sup>2</sup>-°F.

Este valor está dado por :

$$h_{rep} = 0.1714 \times 10^{-8} F_{tci} \left[ (T_{to} + 460)^2 + (T_{ci} + 460)^2 \right] \cdot (T_{to} + 460 + T_{ci} + 460) \quad (1.88)$$

siendo:

$$F_{tci} = \left[ \frac{1}{E_{to}} + \frac{r_{to}}{r_{ci}} \left( \frac{1}{E_{ci}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (1.89)$$

donde:

$T_{to}$  = Temperatura de la superficie exterior de la tubería de producción, °F.

$T_{ci}$  = Temperatura de la superficie interior de la tubería de revestimiento, °F.

$E_{to}$  = Emisividad de la superficie exterior de la tubería de producción, adimensional.

$E_{ci}$  = Emisividad de la superficie interior de la tubería de revestimiento, adimensional.

$h_{cep}$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección externa en la tubería de producción desnuda,  $Btu/hr\text{-pie}^2\text{-}^\circ F$ .

BIBLIOTECA



FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Este coeficiente se lo puede evaluar a través de las siguientes ecuaciones que han sido obtenidas usando valores experimentales correlacionados mediante análisis dimensional, estas ecuaciones son :

$$h_{cep} = \frac{0.049 K_{an} (Gr \cdot Pr)^{0.333} (Pr)^{0.074}}{r_{to} \ln (r_{ci}/r_{to})}$$

$$\text{con, } Gr = \frac{(r_{ci} - r_{to})^3 \cdot g \cdot \rho_{an} \cdot Ban \cdot (T_{to} - T_{ci})}{u_{an}^2} \quad (1.91)$$

$$\text{y, } Pr = \frac{C_{an} \cdot u_{an}}{K_{an}} \quad (1.92)$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL  
(1.90)

donde:

$K_{an}$ ,  $\rho_{an}$ ,  $B_{an}$ ,  $u_{an}$ ,  $C_{an}$  = Conductividad térmica, densidad, coeficiente de expansión volumétrica (térmica), viscosidad dinámica, calor específico del fluido en el espacio anular, están expresadas en: Btu/hr-pie-°F, lb/pie<sup>3</sup>, vol/vol-°F, lb/pie-hr, Btu/lb-°F.

Si se considera que el espacio anular está constituido por aire las variables anteriores pueden ser evaluadas a través de las ecuaciones (1.63), (1.64), (1.65) y (1.67) discutidas anteriormente.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$g$  = Constante de gravedad,  $4.17 \times 10^8$  pie/hr<sup>2</sup>

$r_{to}$ ,  $r_{ci}$ ,  $T_{to}$ ,  $T_{ci}$  = definidas anteriormente.

b) POZO CON TUBERIA DE PRODUCCION AISLADA :

Si se considera una tubería de producción hecha de acero aislada, rodeada por espacio anular constituido por aire, tubería de revestimiento, cemento y formación, en

este sistema se presentarán los siguientes mecanismos de transferencia de calor :

- CONVECCION INTERNA : Entre el vapor y la superficie interna de la tubería de producción, Necesariamente es forzada.
- CONDUCCION : A través de la pared de la tubería de producción.
- CONDUCCION : A través del aislante.
- RADIACION : Entre la superficie exterior del aislante y la interna de la tubería de revestimiento.
- CONVECCION EXTERNA : En el espacio anular limitado entre la superficie exterior del aislante y la interna de la tubería de revestimiento. Necesariamente es libre.
- CONDUCCION : A través de la tubería de revestimiento.
- CONDUCCION : A través del cemento.

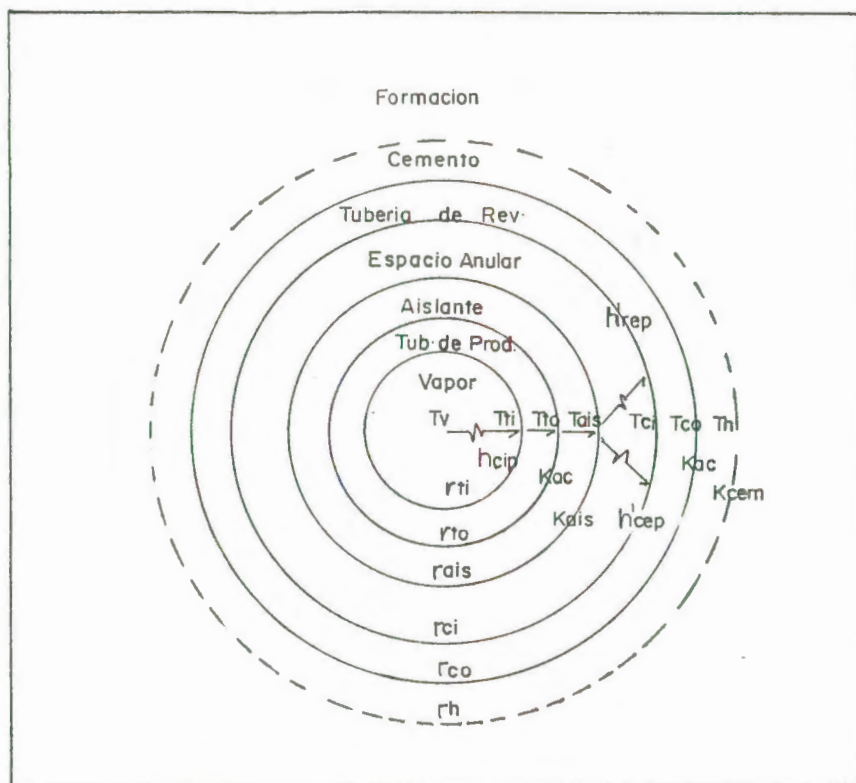


Fig. N° 1.10 TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN POZO CON TUBERÍA DE PRODUCCIÓN AISLADA.

PERDIDAS DE CALOR :



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Las pérdidas de calor en el pozo con tubería de producción aislada (es decir desde el interior de la tubería de producción hasta la interface cemento-formación), puede evaluarse mediante la ecuación :

$$q'_p = h'_p A_{ep} (T_v - T_h) \quad (1.93)$$

donde:

$q'_p, h'_p$  = Definidas anteriormente pero referidas a pozo con tubería de producción

aislada.

$A_{ep}$ ,  $T_v$ ,  $T_h$  = Definidos anteriormente.

NOTA : En pozos con tubería de producción desnuda o aislada se utiliza igual á rea característica.

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL:

La expresión para el coeficiente de transferencia de calor total en un pozo con tubería de producción aislada y referida al área exterior  $A_{ep}$  está dado por :

$$h'_p = \left[ \frac{r_{to}}{r_{ti} h_{cip}} + \frac{r_{to} \ln(r_{to}/r_{ti})}{K_{ac}} + \frac{r_{to} \ln(r_{ais}/r_{to})}{K_{ais}} \right. \\ \left. + \frac{r_{to}}{r_{ais} (h'_{cep} + h'_{rep})} + \frac{r_{to} \ln(r_{co}/r_{ci})}{K_{ac}} + \frac{r_{to} \ln(r_h/r_{co})}{K_{cem}} \right]^{-1} \quad (1.94)$$

donde:

$r_{ais}$  = Radio del aislante, pies.

$K_{ais}$  = Conductividad térmica del aislante,  
Btu/hr-pie-°F.



$h'_{rep}$  = Coeficiente de transferencia de calor por radiación de la superficie exterior de la tubería de producción aislada, Btu/hr-pie<sup>2</sup> -°F.

Este valor está dado por :

$$h'_{rep} = 0.1714 \times 10^{-8} F'_{tci} \left[ (T_{ais} + 460)^2 + (T_{ci} + 460)^2 \right] (T_{ais} + 460 + T_{ci} + 460) \quad (1.95)$$

siendo:

$$F'_{tci} = \left[ \frac{1}{E_{ais}} + \frac{r_{ais}}{r_{ci}} \left( \frac{1}{E_{ci}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (1.96)$$

donde:

$T_{ais}$  = Temperatura de la superficie externa del aislante, °F.

$E_{ais}$  = Emisividad de la superficie exterior del aislante, adimensional.

$h'_{cep}$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección externa en la tubería de producción aislada, Btu/hr-pie<sup>2</sup> -°F.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Este valor está dado por :

$$h'_{cep} = \frac{0.049 \cdot x \cdot K_{an} (G_r \cdot P_r)^{0.333} (P_r)^{0.074}}{r_{ais} \ln (r_{ci}/r_{ais})} \quad (1.97)$$

$$\text{con, } G_r = \frac{(r_{ci} - r_{ais})^3 \cdot g \cdot \rho_{an}^2 \cdot B_{an} (T_{ais} - T_{ci})}{u_{an}^2} \quad (1.98)$$

$$\text{y, } P_r = \frac{C_{an} \cdot u_{an}}{K_{an}} \quad (1.99)$$

(El resto de variables fueron definidas anteriormente).

### 1.3.7 PERDIDAS DE CALOR EN LAS FORMACIONES

Antes de presentar el modelo que describe las pérdidas de calor en las formaciones es conveniente analizar la forma como el calor inyectado se transfiere a la roca, y fluídos de la formación.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Es decir si consideramos inyección continua de vapor en un medio poroso suficientemente largo, e inicialmente saturado con petróleo y agua con nata, el vapor que ingresa a la formación a través del extremo de inyección vapo

riza al petróleo localizado en su vecindad y lo desplaza hacia adelante, dejando atrás una cierta fracción del petróleo que no ha sido vaporizada.

El vapor que avanza se va condensando gradualmente debido a las pérdidas de calor hacia las formaciones adyacentes, generando así una zona o banco de agua caliente que también va desplazando petróleo y enfriándose a medida que avanza hasta finalmente alcanzar la temperatura original del yacimiento.

Desde este punto en adelante el proceso de desplazamiento prosigue tal cual como si se tratara en inyección de agua fría.

De lo anteriormente expuesto se puede concluir que en una formación sometida a inyección continua de vapor se generarán las siguientes zonas de desplazamiento:

- a) Zona de vapor
- b) Zona de agua caliente
- c) Zona de agua fría

MODELO MATEMATICO DE MARX Y LANGENHEIM PARA  
CALENTAMIENTO DE LA FORMACION DURANTE LA IN-  
YECCION CONTINUA DE VAPOR :

El modelo matemático más apropiado para el ca  
so de inyección de vapor es el de Marx-Langenu  
heim, ya que :

- Puede ser usado para determinar:

- a) Volumen de yacimiento calentado, y
- b) Pérdidas de calor

de una arena petrolífera sometida a inyec-  
ción continua de vapor.

- Este modelo fue desarrollado para el caso  
de inyección de vapor húmedo porque se pue-  
de transportar más calor ( $h_{as} + xL_v$ ) que el  
agua caliente ( $h_{as}$ ) y además porque es capaz  
de mantener en solución las impurezas sóli-  
das que de otra manera se depositan en cal-  
deras y equipos.

- Se supuso que la distribución de temperatu-  
ra a un tiempo específico y a lo largo de

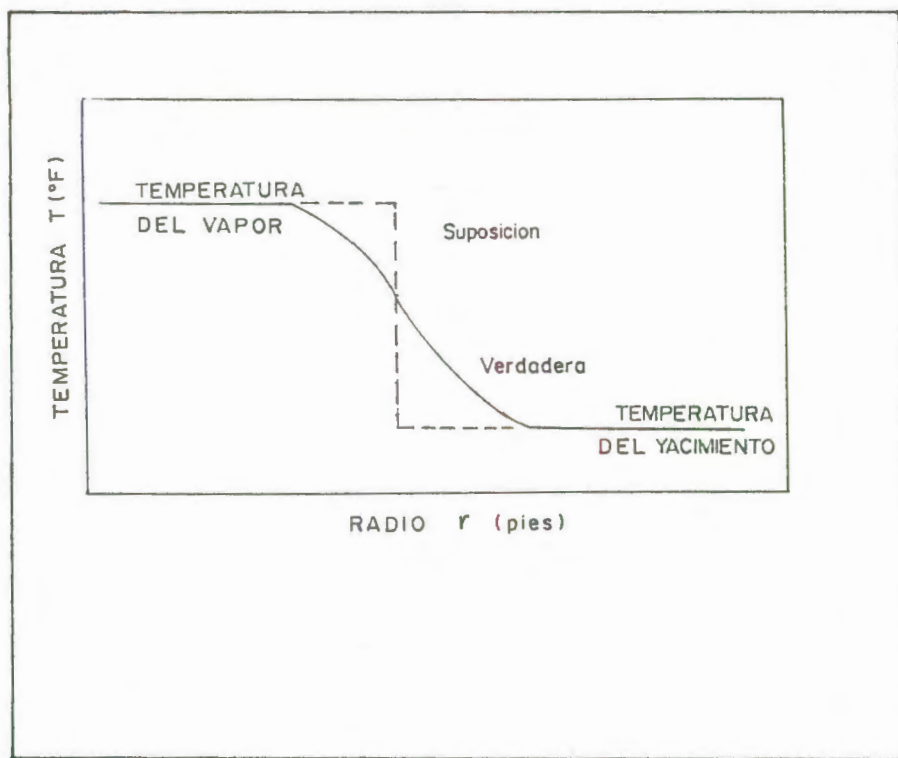


Fig. N° 1.11 DISTRIBUCION DE LA TEMPERATURA ESCALONADA A UN TIEMPO ESPECIFICO, SUPUESTA POR MARX Y LANGENHEIM.

la arena petrolífera es una función escalonada (desde la temperatura del vapor hasta la temperatura de la formación) tal como se muestra en la Fig. N° 1.11, es por esto que las pérdidas de calor se llevan a cabo hasta un punto donde se produce el cambio de la temperatura del vapor a la del yacimiento.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

- Para desarrollar este modelo se consideró la similitud entre las pérdidas de calor

vertical durante la inyección de un fluido caliente con las fugas de fluidos en una arena petrolífera sometida a inyección durante la programación de una fractura horizontal.

- En el desarrollo de este modelo no se establecieron restricciones sobre la dirección de aumento del área calentada (véase Figura N° 1.12) razón por la cual el área calentada calculada por este modelo a determinado tiempo, se puede aplicar a cualquier tipo de geometría de flujo de interés ya sea : flujo lineal, flujo en línea directa, flujo en línea alterna, flujo en 5 pozos, flujo en 7 pozos, etc.

#### CONSIDERACIONES TEORICAS :

El modelo según Fig. N° 1.13, considera que vapor a temperatura ( $T_v$ ) es continuamente inyectado durante un tiempo de inyección ( $t$ ) en una formación petrolífera con espesor constante ( $h$ ), conductividad térmica ( $K$ ), capacidad calorífica por unidad de volumen ( $M = \rho c$ ) y temperatura inicial ( $T_y$ ), además se la conside

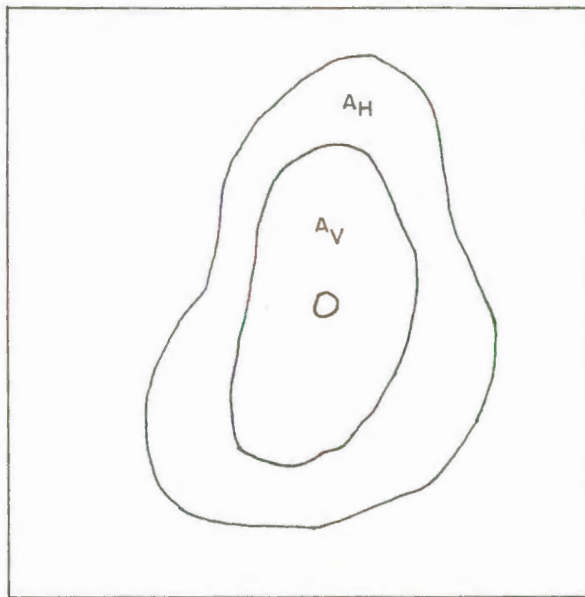


Fig. 1.12 AREAS CALENTADAS POR EL VAPOR ( $A_V$ ) Y EL AGUA CALIENTE ( $A_H$ ) SEGUN MARX Y LANGEHNHEIM.

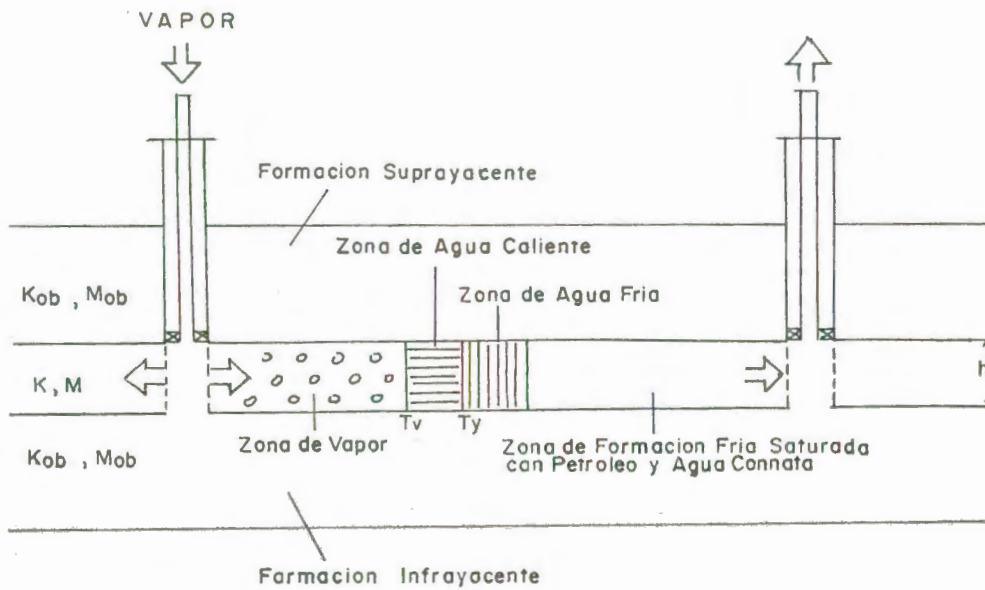


Fig. N° 1.13 FORMACION SOMETIDA A INYECCION CONTINUA DE VAPOR



ra localizada entre 2 formaciones idénticas de espesores infinitos de igual conductividad térmica ( $K_{ob}$ ) e igual capacidad calorífica por unidad de volumen ( $M_{ob} = \rho_{ob} \cdot C_{ob}$ ).

BALANCE INSTANTANEO DE CALOR :

Un balance de calor al tiempo  $t$ , para el sistema considerado según Fig. N° 1.14, puede establecerse así :

$$\dot{Q}_I = \dot{Q}_P + \dot{Q}_U \quad (1.100)$$

BIBLIOTECA



FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA

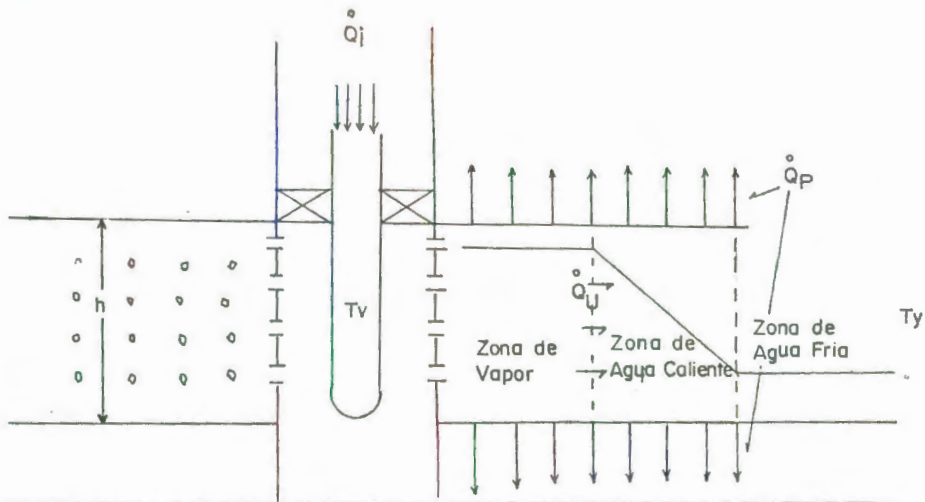


Fig. N° 1.14 TASAS DE CALOR QUE ACTUAN EN UNA FORMACION SOMETIDA A INYECCION CONTINUA DE VAPOR.



tasa de inyec- de calor al tiempo t	=	tasa de pérdidas de calor a las formaciones ad- yacentes al tiempo t.	+	tasa de calor utilizado en el calentamiento de la formación petrolífera al tiempo t.
---	---	---	---	---

En la presente tesis, basándonos en el trabajo original de Marx y Langenheim, la formulación matemática de cada uno de los términos que constituyen el balance anterior, se discute a continuación en función del volumen de formación petrolífera calentada  $V(t)$ , con el objeto de obtener fórmulas que sean más fáciles de usar manualmente y en el computador.

Nótese que el término  $V(t)$  será deducido posteriormente en el apéndice A.



**BIBLIOTECA FICT  
ESPOL**

( $\overset{\circ}{Q}_I$ ) TASA DE INYECCION DE CALOR AL TIEMPO t :

Marx y Langenheim consideró la tasa de inyección de calor  $\overset{\circ}{Q}_I$  constante con el tiempo, por tanto hay que recordar que :

a) Si consideramos que el volumen de formación petrolífera  $V(t)$  está calentada por el vapor  $[V(t)]_V$  entonces  $\overset{\circ}{Q}_I$  debe considerar u-

na fracción del calor latente de vaporización del agua, ya que el vapor inyectado en este período tiene un comportamiento de fases que sigue la trayectoria A-B del diagrama T-h según Fig. N° 1.15, luego:

$$V(t) = [V(t)]_v$$

$$\text{Si } \dot{Q}_I \left( \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \right) = q_v \left( \frac{\text{B}}{\text{D}} \right) \cdot 350 \left( \frac{\text{lb}}{\text{B}} \right) \frac{1}{24} \left( \frac{\text{D}}{\text{hr}} \right) X \cdot L \left( \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right)$$

$$(\dot{Q}_I)_v = 14.6 q_v \cdot X \cdot L \quad (1.101)$$

donde:

$(\dot{Q}_I)_v$  = Tasa de inyección de calor al tiempo  $t$ , considerando zona de vapor, Btu/hr.

14.6 = Factor que convierte (B/D) en (lb/hr).

$q_v$  = Tasa de inyección del vapor, expresado en (B/D) del agua equivalente evaporada en el generador de superficie.

$X$  = Calidad del vapor en la cara de la arena, fracción.

$L$  = Calor latente de vaporización del agua, Btu/lb.

b) Si consideramos que el volumen de formación petrolífera  $V(t)$  está calentada por el vapor y el agua caliente  $V(t)_{V,H}$ , entonces  $\dot{Q}_I$  debe considerar la entalpía del vapor húmedo referida a la temperatura datum del yacimiento, ya que el vapor inyectado en este período tiene un comportamiento de fases que sigue la trayectoria ABC del diagrama  $T - h$  según la Fig. N° 1.15, luego:

-Si la entalpía que se dispone a esta etapa está dada por :

$$h_{h,y} = X L + h_{as,y} \quad (1.102)$$

y si reemplazamos en (1.102) los valores (1.5) y (1.6) se tendrá :

$$h_{h,y} = X L + (h_{as} - h_{a,y}) =$$

$$h_{h,y} = X L + h_{as} - C'_a (T_y - 32)$$

ordenando :

$$h_{h,y} = h_{as} + X L - C'_a (T_y - 32) \quad (1.103)$$

$$\text{Entonces } V(t) = \left[ V(t) \right]_{V,H}$$

$$-Si \quad \dot{Q}_I \left( \frac{Btu}{hr} \right) = q_v \left( \frac{B}{D} \right) 350 \left( \frac{lb}{B} \right) \frac{1}{24} \left( \frac{D}{hr} \right) \left[ h_{as} \left( \frac{Btu}{lb} \right) + X L \right. \\ \left. \left( \frac{Btu}{lb} \right) - C'_a \left( \frac{Btu}{lb \cdot ^\circ F} \right) \left( T_y \text{ (} ^\circ F \text{)} - 32 \text{ (} ^\circ F \text{)} \right) \right]$$

$$\dot{Q}_I \text{ (V,H)} = 14.6 q_v (h_{as} + X L - T_y - 32) ; C'_a \approx 1 \\ (1.104)$$

donde:

$\dot{Q}_I \text{ (V,H)}$  = Tasa de inyección de calor al tiempo  $t$ , considerando zona de vapor y agua caliente, Btu/hr.

14.6 = Factor que convierte (B/D) en (lb/hr)

$q_v$  = Tasa de inyección del vapor, expresado en (B/D) del agua equivalente evaporada en el generador de superficie.

$h_{as}$  = Entalpía del agua saturada, calculada a la temperatura datum de 32°F.

$X$  = Calidad del vapor en la cara de la arena, fracción.

$L$  = Calor latente de vaporización del agua, Btu/lb.

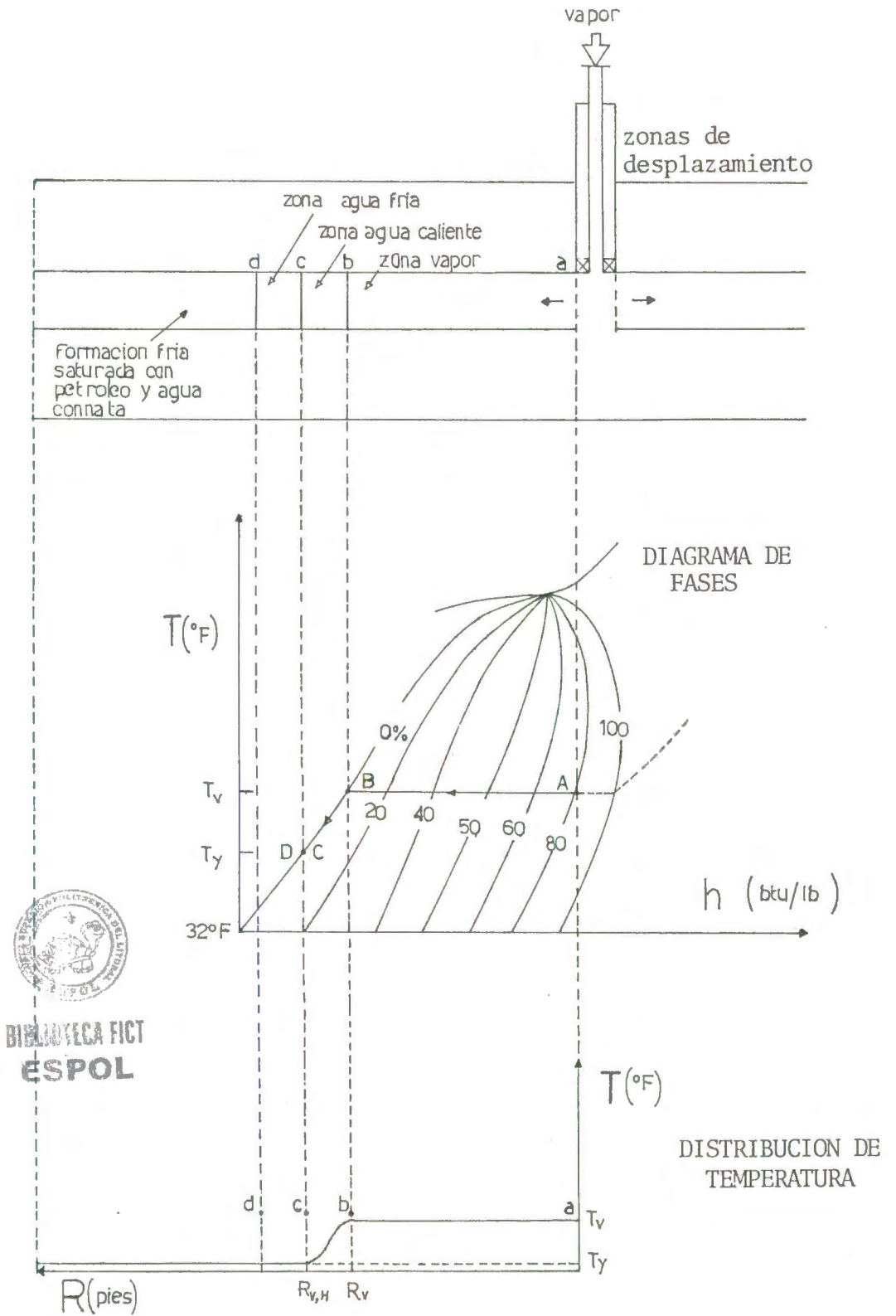


Fig. 1.15 ZONAS DE DESPLAZAMIENTO, DIAGRAMA DE FASES Y DISTRIBUCION DE TEMPERATURA DE UNA FORMACION SOMETIDA A INYECCION CONTINUA DE VAPOR.

$C'_a$  = Calor específico promedio del agua en el intervalo ( $32^\circ\text{F}$ ,  $T_y$ ), que para propósitos prácticos tomo el valor i gual a 1 (Btu/lb- $^\circ\text{F}$ ).

$T_y$  = Temperatura del yacimiento,  $^\circ\text{F}$ .


32 = Temperatura de fusión del agua,  $^\circ\text{F}$ .

$(\dot{Q}_p)$  TASA DE PERDIDAS DE CALOR A LAS FORMACIONES ADYACENTES AL TIEMPO  $t$

Si se asume que en la formación petrolífera calentada sólo existe pérdidas de calor por conducción en la dirección vertical y no en dirección radial, entonces :

La tasa de pérdidas de calor a las formaciones adyacentes al tiempo  $t$  en Btu/hr,

viene dado por :



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

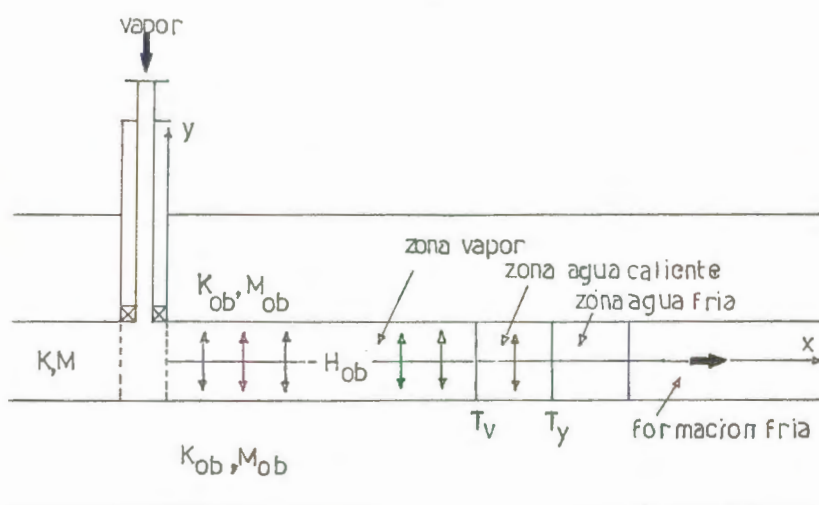
$$\dot{Q}_p = \int_0^{V(t)} H_{ob} dV \quad (1.105)$$

donde:

$H_{ob}$  = Pérdidas de calor a las formaciones adyacentes por unidad de volumen calentado y tiempo de inyección, Btu/hr-pie<sup>3</sup>.

$V(t)$  = Volumen de formación petrolífera ca  
lentada al tiempo  $t$ ,  $\text{pie}^3$ .

ANALISIS DE  $H_{ob}$  :



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

PERDIDAS DE CALOR A LAS FORMACIONES ADYACENTES A UN TIEMPO  $t$ , DE UNA FORMACION SOMETIDA A INYECCION CONTINUA DE VAPOR.

Consideremos los ejes coordenados  $x$ - $y$ , aplicados al medio semi-infinito descrito en la Fig. N° 1.16, donde se supone que la formación de interés ocupa el eje  $x$  por considerar que su espesor es muy pequeño en comparación con las formaciones adyacentes; en este sistema encontraremos que después de la inyección del vapor, la temperatura



tura (T) a lo largo del eje y, disminuye en un valor  $-\frac{\partial T}{\partial y}(y,t)$ , a medida que nos alejamos de la formación petrolífera.

Por esta razón, las pérdidas de calor a las formaciones adyacentes en  $y=0$ , por unidad de volumen calentado y tiempo de inyección, viene dado por la tasa de flujo de calor por conducción en la dirección vertical, por unidad de volumen calentado, esto es :

$$H_{ob} = \frac{(q_u)t}{V(t)} \quad (1.106)$$

Reemplazando la ecuación (1.51) en (1.106), se tendrá :

$$H_{ob} = -2 \frac{K_{ob} A(t)}{V(t)} \left[ \frac{\partial T}{\partial y}(y,t) \right]_{y=0} \quad (1.107)$$

Si  $V(t) = A(t) h$  ; entonces :

$$H_{ob} = -\frac{2 K_{ob}}{h} \left[ \frac{\partial T}{\partial y}(y,t) \right]_{y=0} \quad (1.108)$$



NOTA: El número "2" anterior se refiere a las formaciones supra e infradyacente.

Para resolver la ecuación anterior debo realizar los siguientes pasos :

a) Calcular la expresión de la distribución de temperatura en un medio vertical ( $y$ ); a cualquier tiempo posterior ( $t$ ) dado por  $T(y,t)$ , bajo las condiciones de contorno del sistema considerado.

b) Obtener la derivada  $\frac{\partial T}{\partial y}(y,t)$  y determinar su valor para  $y=0$  .

c) Reemplazar el valor calculado de

$$\left[ \frac{\partial T}{\partial y}(y,t) \right]_{y=0}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

en la ecuación (1.108) y obtener  $H_{ob}$  .

A) Para obtener  $T(y,t)$  debemos recordar que la ecuación general que describe la conducción de calor en un medio tridimensional, está dado por :

$$\nabla^2 T(x,y,z,t) = \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t} (x,y,z,t) \quad (1.109)$$

que desarrollada será :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} (x,y,z,t) + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} (x,y,z,t) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} (x,y,z,t) = \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t} (x,y,z,t) \quad (1.110)$$

donde:

$T(x,y,z,t)$  = Temperatura en función de las direcciones  $x,y,z$ , y del tiempo  $t$ .



$D$  = Difusividad térmica del medio,  $\text{pie}^2/\text{hr}$ .

**BIBLIOTECA FICT**  
**ESPOL**

Está dado por:

$$D = \frac{K}{M} = \frac{K}{\rho C} \quad (1.111)$$

Para nuestro sistema, donde el medio son las formaciones adyacentes, la ecuación en derivadas parciales que describe la conducción de calor en el medio unidireccional ( $y$ ), está dado por :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}(y,t) = \frac{1}{D_{ob}} \frac{\partial T}{\partial t}(y,t) \quad (1.112)$$

donde:

$T(y,t)$  = Temperatura en función de la dirección vertical  $y$ , i del tiempo  $t$ .

$D_{ob}$  = Difusividad térmica a través de las formaciones adyacentes,  $\text{pie}^2/\text{hr}$ .

Esta dado por :

$$D_{ob} = \frac{K_{ob}}{M_{ob}} = \frac{K_{ob}}{\rho_{ob} C_{ob}} \quad (1.113)$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Tomando la transformada de Laplace de la ecuación (1.112) se obtiene una ecuación diferencial ordinaria denominada ecuación subsidiaria, en la cual ( $y$ ) es la única variable independiente esto es :

$$\mathcal{L} \left[ \frac{\partial^2 T(y,t)}{\partial y^2} \right] = \frac{1}{D_{ob}} \mathcal{L} \left[ \frac{\partial T}{\partial t}(y,t) \right]$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} \mathcal{L} \left[ T(y,t) \right] = \frac{1}{D_{ob}} \left[ s \mathcal{L} \left[ T(y,t) \right] - T(y,0) \right]$$

$$y \text{ si } \mathcal{L}[T(y,t)] = \hat{T}(y,s) \quad (1.114)$$

entonces :

$$\frac{d^2}{dy^2} \hat{T}(y,s) = \frac{1}{D_{ob}} \left[ s \hat{T}(y,s) - T(y,0) \right]$$

$$\frac{d^2}{dy^2} \hat{T}(y,s) - \frac{s}{D_{ob}} \hat{T}(y,s) = - \frac{T(y,0)}{D_{ob}} \quad (1.115)$$

para resolver la ecuación SUBSIDIARIA anterior es necesario tomar en cuenta las condiciones de contorno del sistema considerado, o sea :

- a)  $T(y,0) = T_y$  (1.116)
- b)  $T(a,t) = T_y$
- c)  $T(0,t) = T_v$
- d)  $T(y,t) = ?$

por tanto :

- a) Si  $T(y,0) = T_y$

y si  $\hat{T}(y,s)$  es la temperatura transformada o en su lugar  $\hat{T}$  para simplificar, tendremos:

$$\frac{d^2 \hat{T}}{dy^2} - \frac{s}{D_{ob}} \hat{T} = - \frac{Ty}{D_{ob}} \quad (1.117)$$

ya que la ecuación anterior es una ecuación diferencial ordinaria lineal no homogénea de segundo orden con coeficiente constante, trataremos de hallar su solución general, esto es :

$$\hat{T} = \hat{T}_H + \hat{T}_P \quad (1.118)$$

-CALCULO DE  $\hat{T}_H$  :

Determino la ecuación característica de la homogénea correspondiente esto es :

$$\lambda^2 - S/D_{ob} = 0$$

cuyas raíces serán :

$$\lambda_H = \frac{-0 \pm \sqrt{0 - 4(-S/D_{ob})}}{2} = \pm \sqrt{\frac{S}{D_{ob}}}$$

Por lo tanto, la solución de la ecuación homogénea correspondiente será :

$$\hat{T}_H = C_1 e^{\lambda_1 y} + C_2 e^{\lambda_2 y}$$

$$\hat{T}_H = C_1 e^{y \sqrt{S/D_{ob}}} + C_2 e^{-y \sqrt{S/D_{ob}}} \quad (1.119)$$

-CALCULO DE  $\hat{T}_p$  :

Por el método de los coeficientes indeterminados (Tabla I, pág. 114, Erwin Kreyszig, v.1), y si la regla de la modificación no se aplica por cuanto  $\lambda_H \neq 0$ , entonces una solución particular de (1.117) será :

$$\hat{T}_p = A, Y + B \quad (1.120)$$

si reemplazo (1.120) en (1.117) tendré:

$$\frac{d^2}{dy^2} \hat{T}_p - \frac{S}{D_{ob}} \hat{T}_p = - \frac{T_y}{D_{ob}}$$

$$\frac{d^2}{dy^2} (Ay + B) - \frac{S}{D_{ob}} (Ay + B) = - \frac{T_y}{D_{ob}}$$

$$0 - \frac{S}{D_{ob}} (Ay + B) = - \frac{T_y}{D_{ob}}$$

$$\frac{S}{D_{ob}} Ay + \frac{S}{D_{ob}} B = \frac{T_y}{D_{ob}}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Comparando los coeficientes de la ecuación anterior se tendrá :

$$\frac{s}{D_{ob}} A = 0 \Rightarrow A = 0$$

$$\frac{s}{D_{ob}} B = \frac{Ty}{D_{ob}} \Rightarrow B = \frac{Ty}{s}$$

reemplazando estos valores en (1.120):

$$\hat{T}_P = (0) y + \frac{Ty}{s} = \frac{Ty}{s} \quad (1.121)$$

-CALCULO DE  $\hat{T}$  :

$$\text{Si } \hat{T} = \hat{T}_H + \hat{T}_P$$

reemplazando (1.119) y (1.121) en lo anterior, se tendrá la solución general de la ecuación subsidiaria (1.115), esto es :

$$\hat{T}(y,s) = C_1 e^{y \sqrt{s/D_{ob}}} + C_2 e^{-y \sqrt{s/D_{ob}}} + \frac{Ty}{s} \quad (1.122)$$

Como último paso del procedimiento se necesita determinar :

$$\mathcal{L}^{-1}\{\hat{T}(y,s)\} = T(y,t)$$

pero antes es necesario determinar las constantes  $C_1$  y  $C_2$  anteriores ayudado por las condiciones de contorno, es decir :

b) Si  $T(\infty,t) = T_y$

y sabiendo que la transformada de Laplace de una constante ( $c$ ) es  $\mathcal{L}(c) = \frac{c}{S}$ , tendremos :

$$\begin{aligned}\mathcal{L}\{T(\infty,t)\} &= \mathcal{L}\{T_y\} \\ \hat{T}(\infty,S) &= \frac{T_y}{S}\end{aligned}$$

Sustituyendo  $y = \infty$  en (1.122) se tiene :

$$\hat{T}(\infty,s) = c_1 e^{\infty \sqrt{s/D_{ob}}} + c_2 e^{-\infty \sqrt{s/D_{ob}}} + \frac{T_y}{S}$$

$$\text{Si: } \hat{T}(\infty,s) = \frac{T_y}{S}; e^{\infty} \rightarrow \infty; e^{-\infty} \rightarrow 0$$

reemplazando en la ecuación anterior se tendrá :



$$\frac{T_y}{s} = c_1 (\infty) + c_2 (0) + \frac{T_y}{s}$$

$$\therefore c_1 = \frac{0}{\infty} = 0$$

Por tanto, la solución (1.122) se transforma en :

$$\hat{T}(y,s) = c_2 e^{-y \sqrt{s/D_{ob}}} + \frac{T_y}{s} \quad (1.123)$$

c) Si  $T(0,t) = T_v$

su transformada de Laplace será :

$$\hat{T}(0,s) = \frac{T_v}{s}$$

sustituyendo  $y = 0$  en (1.123)

$$\hat{T}(0,s) = c_2 e^{-(0) \sqrt{s/D_{ob}}} + \frac{T_y}{s}$$

$$\text{Si } \hat{T}(0,s) = \frac{T_v}{s} ; e^0 = 1$$

reemplazando en la ecuación anterior se tendrá :

$$\frac{T_v}{s} = c_2 + \frac{T_y}{s}$$

$$\therefore c_2 = \frac{T_v - T_y}{s}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Finalmente la solución (1.123) se transforma en :

$$\hat{T}(y,s) = \frac{T_v - T_y}{s} e^{-y \sqrt{s/D_{ob}}} + \frac{T_y}{s} \quad (1.124)$$

Tomando la transformada inversa de la ecuación anterior se trata de obtener la función  $T(y,t)$  que es la buscada :

Es decir :

$$\begin{aligned} T(y,t) &= \mathcal{L}^{-1} \mathcal{L} \{ T(y,t) \} \\ &= \mathcal{L}^{-1} \{ \hat{T}(y,s) \} \\ &= \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{T_v - T_y}{s} e^{-y \sqrt{s/D_{ob}}} + \frac{T_y}{s} \right\} \\ &= (T_v - T_y) \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \exp \left( - \frac{y}{\sqrt{D_{ob}}} \sqrt{s} \right) \right\} + \\ &\quad + T_y \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \right\} \end{aligned}$$

y si :

$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \exp (-K \sqrt{s}) \right\} = \text{ERFC} \left( \frac{K}{2\sqrt{t}} \right)$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \right\} = 1$$

tendremos :

$$T(y,t) = (T_v - T_y) \operatorname{ERFC}\left(\frac{y/\sqrt{D_{ob}}}{2\sqrt{t}}\right) + T_y$$

puesto que la función error complementario

$\operatorname{ERFC}(x) = 1 - \operatorname{ERF}(x)$ ; entonces :

$$\begin{aligned} T(y,t) &= (T_v - T_y) \left[ 1 - \operatorname{ERF}\left(\frac{y}{2\sqrt{D_{ob}t}}\right) \right] + T_y \\ &= (T_v - T_y) - (T_v - T_y) \operatorname{ERF}\left(\frac{y}{2\sqrt{D_{ob}t}}\right) + T_y \end{aligned}$$

$$T(y,t) = T_v - (T_v - T_y) \operatorname{ERF}\left(\frac{y}{2\sqrt{D_{ob}t}}\right); \quad (1.125)$$



BIBLIOTECA FICT  
**ESPOL**

$y$  = distancia vertical

B) Para obtener  $\left[\frac{\partial T(y,t)}{\partial y}\right]_{y=0}$  se debe obtener primero la derivada de la ecuación (1.125) y luego reemplazar ( $y$ ) por cero, esto es :

$$\frac{\partial}{\partial y} T(y,t) = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ T_v - (T_v - T_y) \operatorname{ERF}\left(\frac{y}{2\sqrt{D_{ob}t}}\right) \right\}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} T(y,t) = \cancel{\frac{\partial}{\partial y} T_v} - (T_v - T_y) \frac{\partial}{\partial y} \operatorname{ERF}\left(\frac{1}{2\sqrt{D_{ob}t}} \cdot y\right)$$

y si :

$$\operatorname{ERF}(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{t=ay} e^{-t^2} dt$$

$$\Rightarrow \operatorname{ERF}(ay) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{ay} e^{-a^2 y^2} a dy$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dy} \operatorname{ERF}(ay) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} a e^{-a^2 y^2}$$

tendremos :

$$\frac{\partial}{\partial y} T(y,t) = - (T_v - T_y) \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{2\sqrt{D_{ob}t}} \exp\left(-\frac{1}{4D_{ob}t} y^2\right) \right\}$$

La ecuación anterior evaluada en  $y=0$  será:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial y} T(y,t) \right]_{y=0} = - \frac{(T_v - T_y)}{\sqrt{\pi D_{ob}t}} \quad (1.126)$$

C) Reemplazando (1.126) en (1.108), se obtiene las pérdidas de calor a las formaciones adyacentes por unidad de volumen calentado y

tiempo de inyección, esto es :

$$H_{ob} = - 2 \frac{K_{ob}}{h} \left( - \frac{(T_v - T_y)}{\sqrt{\pi D_{ob} t}} \right)$$

$$H_{ob} = \frac{2 K_{ob} (T_v - T_y)}{h \sqrt{\pi D_{ob} t}} \quad (1.127)$$

ANALISIS DE  $\dot{Q}_P$  :

Para analizar la tasa de pérdidas de calor a las formaciones adyacentes al tiempo  $t$ , debemos partir de la ecuación (1.105) del texto anterior, es decir :

$$\dot{Q}_P = \int_0^{V(t)} H_{ob} dV$$

Si reemplazamos  $H_{ob}$  por la ecuación anterior (1.127) y dada por :

$$H_{ob} = \frac{2K_{ob} (T_v - T_y)}{h \sqrt{\pi D_{ob} t}}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

entonces :

$$\dot{Q}_P = \int_0^{V(t)} \frac{2 K_{ob} (T_v - T_y)}{h \sqrt{\pi D_{ob} t}} dV \quad (1.128)$$

donde :

$\dot{Q}_p$  = Tasa de pérdidas de calor a las formaciones adyacentes al tiempo  $t$ , Btu/hr.

$K_{ob}$  = Conductividad térmica de las formaciones adyacentes, Btu/hr-pie-°F.

$T_v, T_y$  = Temperatura del vapor y el yacimiento, °F.

$h$  = Espesor promedio de la formación petrolífera, pies.

$D_{ob}$  = Difusividad térmica de las formaciones adyacentes, pie<sup>2</sup>/hr.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Este valor está dado por :

$$D_{ob} = \frac{K_{ob}}{M_{ob}} \quad (1.129)$$

donde:

$M_{ob}$  = Capacidad calorífica por unidad de volumen de las formaciones adyacentes, Btu/pie<sup>3</sup>-°F.

$t$  = Tiempo de inyección del vapor, hr.

$V(t)$  = Volumen de formación petrolífera calentada al tiempo  $t$ , pie<sup>3</sup>.

Este valor está dado por la ecuación (30), deducida en apéndice.

$\dot{Q}_U$ ) TASA DE CALOR UTILIZADO EN EL CALENTAMIENTO DE LA FORMACION PETROLIFERA AL TIEMPO  $t$ .

Si el volumen de formación petrolífera calentada varía con el tiempo, entonces :

- Volumen calentado al tiempo  $t = V(t)$
- Volumen calentado al tiempo  $(t+\Delta t) = V(t+\Delta t)$

Nótese que  $Q = mc\Delta T = C_c \Delta T = V \frac{C_c}{V} \Delta T = VM \Delta T$   
(1.130)

- Calor utilizado al tiempo  $t = V(t) M \Delta T$
- Calor utilizado al tiempo  $(t+\Delta t) = V(t+\Delta t) M \Delta T$

Luego la tasa de calor utilizado en el calentamiento de la formación petrolífera al tiempo  $t$ , estará dado por :

$$\dot{Q}_U = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{V(t+\Delta t) M \Delta T - V(t) M \Delta T}{\Delta t}$$

$$\dot{Q}_U = M \Delta T \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{V(t + \Delta t) - V(t)}{\Delta t}$$

$$\dot{Q}_U = M \Delta T \frac{dV(t)}{dt} \quad (1.131)$$

si reemplazamos  $\frac{dV(t)}{dt}$  por la ecuación (34) deducida en apéndice y cuyo valor es :

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{\dot{Q}_I}{M \Delta T} \{ \text{EXP}(t_D^2) \text{ERFC } t_D \}$$

Entonces :

$$\dot{Q}_U = M \Delta T \frac{\dot{Q}_I}{M \Delta T} \{ \text{EXP}(t_D^2) \text{ERFC } t_D \}$$

cancelando términos y arreglando se tendrá:

$$\dot{Q}_U = \dot{Q}_I \{ \text{EXP}(t_D^2) \text{ERFC } t_D \} \quad (1.132)$$

donde:

$\dot{Q}_U$  = Tasa de calor utilizado en el calentamiento de la formación petrolífera al tiempo  $t$ , Btu/hr.

$\dot{Q}_I$  = Tasa de inyección de calor al tiempo  $t$ , Btu/hr.

$t_D$  = Tiempo adimensional, definida por la ecuación (29) del apéndice.

BIBLIOTECA



FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA



## CAPITULO II

### INYECCION CONTINUA DE VAPOR

La inyección continua de vapor es un proceso de desplazamiento bastante complejo, en donde el petróleo se desplaza inicialmente mediante una invasión con agua fría, seguido muy de cerca por una invasión de condensado y agua caliente y finalmente por una mezcla gaseosa (vapor-hidrocarburos vaporizados); originándose un desplazamiento parcialmente miscible.

El método consiste en inyectar vapor en forma continua a través de algunos pozos y producir petróleo por otros tal como en inyección de agua, es por esto que los pozos de inyección y producción se perforan en arreglos.



**BIBLIOTECA FICT  
ESPOL**

La inyección continua de vapor es más eficiente que la estimulación con vapor desde el punto de vista de la última recuperación, es decir de 6 a 15% para la cíclica versus 40 a 50% para la inyección continua, es por esto que muchos proyectos que fueron inicialmente de inyección cíclica, actualmente se los ha convertido a inyección continua debido a las perspectivas de recuperación antes mencionadas.

## 2.1 MECANISMOS DE RECUPERACION EN INYECCION CONTINUA DE VAPOR

Cuando se inyecta en forma continua en una formación petrolífera, el petróleo es producido por causa de tres mecanismos básicos :

- destilación por vapor
- reducción de viscosidad, y
- expansión térmica

siendo la destilación con vapor el más importante.

Otros fenómenos que contribuyen a la recuperación de petróleo son :

- la extracción con solventes
- empuje por gas en solución, y
- desplazamiento miscibles por efecto de la destilación con vapor.



BIBLIOTECA FICT

ESPOL

Las magnitudes relativas de cada uno de estos efectos dependen de las propiedades del petróleo y del medio poroso en particular.

La recuperación de petróleo obtenida de la zona de agua fría, será aproximadamente igual a la calculada

para una inyección de agua convencional, excepto que la tasa efectiva de inyección será mayor que lo que se inyecta como vapor, debido a la capacidad expansiva del vapor.

En la zona de agua caliente, la recuperación de petróleo está gobernada básicamente por las características térmicas del petróleo envuelto. Si la viscosidad del petróleo exhibe una drástica disminución con aumento de la temperatura, la zona de agua caliente contribuirá considerablemente a la recuperación de petróleo.

Si por el contrario, el cambio de viscosidad del petróleo con temperatura es moderado, los beneficios obtenidos con el agua caliente serán solo ligeramente mayores que los obtenidos con inyección de agua fría convencional.

Sin embargo, la expansión térmica del petróleo aún será responsable de una recuperación del orden del 3% al 5% del petróleo "in-situ".

En la zona de vapor el efecto predominante es la destilación con vapor. Este fenómeno básicamente consiste en la destilación de los componentes relativa-

mente livianos del petróleo no desplazado por las zonas de agua fría y caliente, los cuales se caracterizan por una alta presión de vapor.

La presencia de la fase gaseosa y la alta temperatura originan la vaporización de los componentes livianos, los cuales son transportados hacia adelante por el vapor, hasta que se condensan en la porción más fría del yacimiento.

La recuperación por la destilación con vapor depende de la composición del petróleo envuelto, y puede alcanzar hasta el 20% del petróleo "in-situ".

El petróleo delante de la zona de vapor se hace cada vez más rico en componentes livianos, lo cual causa efectos de extracción por solventes y desplazamientos miscibles en el petróleo original del yacimiento, aumentando así, la recuperación. La magnitud de estos efectos no ha sido posible de evaluar cuantitativamente.



BIBLIOTECA FICT

ESPOL

Otro mecanismo que opera en la zona de vapor es el empuje por gas en solución, ya que el vapor es una fase gaseosa. La recuperación por este factor puede ser del orden del 3% de la recuperación total.

## 2.2 CALCULO DE LA RECUPERACION POR INYECCION CONTINUA DE VAPOR

Una aproximación simplificada de la recuperación de petróleo en un yacimiento sometido a inyección continua de vapor, y de fácil uso en el computador ha sido establecida por el autor tomando como base el procedimiento del National Petroleum Council (NPC), en donde fundamentalmente se ignora la recuperación de petróleo en la zona de agua fría, es decir el estimado de la recuperación se basa sólo en las saturaciones de petróleo residual en las zonas de vapor  $(S_{or})_V$ , y agua caliente  $(S_{or})_H$ .

Para lograr esto es necesario realizar los siguientes pasos :

- 1) Calcular el volumen de formación petrolífera calentada por el vapor y agua caliente  $V(t)_{V,H}$  a una serie de tiempos hasta el límite económico  $(t_L)$ , utilizando un modelo de calentamiento.
- 2) Para la serie de tiempos y volúmenes calentados anteriores, obtener las correspondientes recuperaciones de petróleo  $N_p(t)_{V,H}$  considerando que la saturación de petróleo en la zona barrida por va-

por se reduce desde la saturación de petróleo inicial ( $S_{oi}$ ) hasta la saturación del petróleo residual en la zona de vapor ( $S_{or})_v$ , y además la saturación de petróleo en la zona barrida por el agua caliente se reduce desde la saturación de petróleo inicial ( $S_{oi}$ ) hasta la saturación del petróleo residual en la zona de agua caliente ( $S_{or})_H$ .

También hay que considerar la eficiencia areal, eficiencia vertical y saturación de petróleo residual de las zonas barridas por el vapor y agua caliente; que están tabuladas en la Tabla IV de parámetros de recuperación por inyección continua de vapor según el NPC.



BIBLIOTECA FICT

ESPOL

De lo anteriormente expuesto, se concluye que la recuperación acumulada de petróleo a un tiempo de interés y de acuerdo al NPC, viene dado por :

$$N_p(t)_{V,H} = V(t)_{V,H} \phi \{ [S_{oi} - (S_{or})_V] (E_v)_V (E_c)_V + [S_{oi} - (S_{or})_H] (E_v)_H (E_c)_H \} \quad (2.1)$$

donde:

$V(t)_{V,H}$  está dado en  $\text{pie}^3$



y  $N_p(t)_{V,H}$  está dado en pie<sup>3</sup>.

Ya que  $V(t)_{V,H}$  se refiere al volumen de formación petrolífera calentada por el vapor y el agua caliente, entonces  $V(t)_{V,H}$  se reemplazará por la ecuación (30) deducida en apéndice, pero considerando que :

$$\dot{Q}_I = (\dot{Q}_I)_{V,H} , \text{ por tanto :}$$

$$N_p(t)_{V,H} = \frac{(\dot{Q}_I)_{V,H} \cdot M \cdot h^2 \cdot D_{ob}}{4 K_{ob}^2 (T_v - T_y)} \left\{ \text{EXP}(t_D^2) \text{ERFC } t_D + \frac{2}{\sqrt{\pi}} t_D - 1 \right\} \cdot \phi$$

$$\left\{ [S_{oi} - (S_{or})_v] (E_v)_v (E_c)_v + [S_{oi} - (S_{or})_H] (E_v)_H (E_c)_H \right\}$$



(2.2)

Arreglando y convirtiendo (2.2) de pie<sup>3</sup> a STB, tendremos :

$$N_p(t)_{V,H} = \frac{(\dot{Q}_I)_{V,H} \cdot M \cdot h^2 \cdot D_{ob} \cdot \phi}{4 K_{ob}^2 (T_v - T_y) \cdot 5.615 B_o} \left\{ \text{EXP}(t_D^2) \text{ERFC } t_D + \frac{2}{\sqrt{\pi}} t_D - 1 \right\}$$

$$\left\{ [S_{oi} - (S_{or})_v] (E_v)_v (E_c)_v + [S_{oi} - (S_{or})_H] (E_v)_H (E_c)_H \right\}$$

(2.3)

donde:

$N_p(t)_{V,H}$  = Recuperación acumulada de petróleo a un tiempo  $t$ , considerando sólo las zonas de vapor y agua caliente, STB.

$(\dot{Q}_I)_{V,H}$  = Tasa de inyección de calor al tiempo  $t$ , considerando zona de vapor y agua caliente, Btu/hr.

Este valor está dado por la ecuación (1.104).

$M$  = Capacidad calorífica por unidad de volumen, de la formación petrolífera inicialmente saturada con petróleo y agua connata. Este valor está dado por la ecuación (1.34), exceptuando el término que contiene saturación de gas, ya que en este caso  $S_g = 0$

$h$  = Espesor de la formación, pies.

$D_{ob}$  = Difusividad térmica de las formaciones adyacentes,  $\text{pie}^2/\text{hr}$ .

$\phi$  = Porosidad de la formación petrolífera, fracción.



$K_{ob}$  = Conductividad térmica de las formaciones adyacentes, Btu/hr-pie-°F.

$T_v, T_y$  = Temperaturas del vapor y yacimiento, °F.

$B_o$  = Factor volumétrico del petróleo, B/STB.

$t_D$  = Tiempo adimensional, adimensional.

Este valor está dado por la ecuación (29) deducida en apéndice.

$S_{oi}$  = Saturación del petróleo inicial, fracción.

Este valor está dado por :

$$S_{oi} = 1 - S_{wc} - S_{gi} \quad (2.4)$$



donde:

$S_{wc}$  = Saturación de agua connata o inicial, fracción.

$S_{gi}$  = Saturación de gas inicial, fracción.

Este valor se considera nulo debido a que la formación petrolífera inicialmente se encuentra saturada sólo de petróleo y agua connata.

BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$(S_{or})_V, (S_{or})_H$  = Saturación del petróleo residual en la zona barrida por el vapor y el agua caliente, fracciones.

Estos valores están tabulados en la Tabla IV.

$(E_V)_V, (E_V)_H$  = Eficiencia volumétrica de la formación barrida por el vapor y el agua caliente, fracciones.

Estos valores se determinan a través de las siguientes ecuaciones:

$$(E_V)_V = (E_A)_V (E_Z)_V \quad (2.5)$$

$$(E_V)_H = (E_A)_H (E_Z)_H \quad (2.6)$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

donde:

$(E_A)_V, (E_A)_H$  = Eficiencia areal de la formación barrida por el vapor y el agua caliente, fracciones.

Estos valores están tabulados en la Tabla IV.

$(Ez)_V, (Ez)_H$  = Eficiencia vertical de la formación barrida por el vapor y el agua caliente, fracciones.

Este valor está tabulado en la Tabla IV.

$(E_C)_V, (E_C)_H$  = Eficiencia de captura del petróleo desplazado por el vapor y el agua caliente, fracciones.

Estos valores se determinan a través de las siguientes ecuaciones:

$$(E_C)_V = 1 - f_C [1.0 - (EA)_V](1 - S_{WC} - S_{oi}) \quad (2.7)$$

$$(E_C)_H = 1 - f_C [1.0 - (EA)_H](1 - S_{WC} - S_{oi}) \quad (2.8)$$

donde:

$f_C$  = Factor empírico de captura, factor.

Este valor está tabulado en la Tabla V.

$S_{WC}$  = Saturación de agua connata o inicial, fracción.

3) Una vez obtenida la recuperación acumulada de petróleo  $N_p(t)_{V,H}$  a un tiempo de interés, a ese mismo tiempo puede obtenerse la tasa de producción de petróleo, derivando numéricamente:

$$\frac{d}{dt} N_p(t)_{V,H} = q_o \quad (2.9)$$

Luego si partimos de la ecuación (2.1) se tendrá:

$$N_p(t)_{V,H} = V(t)_{V,H} \phi \{ [S_{oi} - (S_{or})_V] (E_V)_V (E_C)_V + [S_{oi} - (S_{or})_H] (E_V)_H (E_C)_H \}$$

Entonces :

$$\frac{d}{dt} N_p(t)_{V,H} = \phi \{ [S_{oi} - (S_{or})_V] (E_V)_V (E_C)_V + [S_{oi} - (S_{or})_H] (E_V)_H (E_C)_H \} \frac{d}{dt} V(t)_{V,H} \quad (2.10)$$

Reemplazando  $\frac{d}{dt} V(t)_{V,H}$  por la ecuación (34) deducida en apéndice , pero considerando

$$\dot{Q}_I = (\dot{Q}_I)_{V,H} , \text{ tendremos :}$$

$$\frac{d}{dt} N_p(t)_{V,H} = \phi \{ [S_{oi} - (S_{or})_V] (E_V)_V (E_C)_V + [S_{oi} - (S_{or})_H] (E_V)_H (E_C)_H \} \frac{(\dot{Q}_I)_{V,H}}{M(T_V - T_Y)} \text{EXP}(t_D^2) \text{ERFC } t_D \quad (2.11)$$

Arreglando y convirtiendo (2.11) de  $\text{pie}^3/\text{hr}$  a  $\text{STB/D}$  tendremos :

$$q_o = \frac{d}{dt} N_p(t)_{V,H} = \frac{24 (\dot{Q}_I)_{V,H} \phi}{5.615 B_o M(T_V - T_Y)} \{ \text{EXP}(t_D^2) \text{ERFC } t_D \}.$$



BIBLIOTECA  
ESPOL

$$\{ [S_{oi} - (S_{or})_V] (E_V)_V (E_C)_V + [S_{oi} - (S_{or})_H] (E_V)_H (E_C)_H \} \quad (2.12)$$

donde:

$q_o$  = Tasa de producción de petróleo a un tiempo determinado,  $\text{STB/D}$ .

Y, el resto de variables ya fueron definidas en la ecuación (2.3).

- 4) Determinar el petróleo originalmente en el yacimiento, utilizando la siguiente ecuación :

$$N = \frac{\pi r_{\text{máx}}^2 h \phi S_{oi}}{5.615} \quad (2.13)$$

donde :

$N$  = Petróleo originalmente en el yacimiento, B.

$r_{\text{máx}}$  = Radio máximo del arreglo de flujo bajo con  
sideración, pies.

$h$  = Espesor de la formación, pies.

$\phi$  = Porosidad, fracción.

$S_{oi}$  = Saturación de petróleo inicial, fracción.

5) Establecer gráficas de :

a)  $N_p$  vrs  $t$

b)  $q_o$  vrs  $t$



**BIBLIOTECA FICT  
ESPOL**

donde :

- La gráfica  $N_p$  vrs  $t$ , ilustra el comportamiento de producción de un yacimiento sometido a inyección continua de vapor.
- La gráfica  $q_o$  vrs  $t$  establece las tasas de producción de petróleo que se tendrán en los pozos productores de un yacimiento sometido a inyección continua de vapor.

La aproximación simplificada anterior para el cálculo de recuperación de petróleo en un proceso de inyección continua de vapor, tiene como principales limitaciones las siguientes suposiciones:

- a) Se considera un medio poroso suficientemente largo e inicialmente saturado con petróleo y agua connata.
- b) Se supone que el vapor se inyecta a una temperatura, presión y calidad constante.
- c) Se asume tasa de inyección de vapor constante, aunque en este proceso de inyección continua de vapor una tasa de inyección variable es físicamente más apropiada debido a que la inyectividad del pozo aumenta a medida que se desplaza más fluido viscoso del punto de inyección.
- d) Se considera que el proceso de recuperación a lo largo de las 3 zonas de desplazamiento ocurre bajo condiciones de flujo continuo.
- e) Se considera flujo radial a partir del pozo de inyección, debido a que el volumen calentado



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$V(t)_{v,H}$  utilizado en el cálculo de  $N_p(t)_{v,H}$  es aplicado a cualquier tipo de geometría de flujo de interés de acuerdo con la conclusión del modelo de calentamiento de Marx y Langenheim, en el cual no se estableció restricción sobre la dirección de desarrollo del volumen calentado.

- f) El volumen calentado  $V(t)_{v,H}$ , la recuperación de petróleo  $N_p(t)_{v,H}$  y el petróleo originalmente en el yacimiento  $N$  son calculados en base al espesor realmente los dos últimos valores deberían ser calculados en base al espesor neto de la formación.



- g) Debe tenerse presente que la distribución de temperatura escalonada, supuesta por Marx y Langenheim según Fig. N° 1.11, a pesar de que no es físicamente correcta, resultará en un estimado conservador de la distribución de temperatura a un determinado tiempo, por tal razón los cálculos de  $V(t)_{v,H}$  y  $N_p(t)_{v,H}$  suponen que la temperatura tanto en la zona de vapor como en la zona de agua caliente son iguales a la temperatura del vapor inyectado ( $T_v$ ), y además un cambio brusco desde la temperatura del



vapor inyectado hasta la temperatura del yacimiento ( $T_y$ ) está implícito en el frente de agua caliente, aunque en la realidad tal transición será gradual.

NOTA : Generalmente en proyectos de inyección continua de vapor se aconseja utilizar un arreglo de 5 pozos invertidos, cuyas dimensiones estarán determinadas por un procedimiento de ensayo y error que considera los costos de perforación de pozos y los ingresos netos de la recuperación de petróleo.



**BIBLIOTECA FICT  
ESPOL**

SEGUN : NPC (Para VISCOSIDAD ELEVADA)									
VISCOSIDAD ELEVADA $u \geq 100$ cp $\rightarrow$ G.E. $\leq 15^\circ$ API									
VISCOSIDAD MODERADA $u < 100$ cp $\rightarrow$ G.E. $> 15^\circ$ API									
ZONA	$E_A$			$E_Z$ (pie/zona)			$S_{or}$		
	2.5ac.	5ac.	$\geq 10$ ac.	2.5ac.	5ac.	$\geq 10$ ac.	2.5ac.	5ac.	$\geq 10$ ac.
VAPOR	0.70	0.65	0.60	20	15	10	0.15	0.15	0.15
AGUACA LIENTÉ	0.90	0.85	0.80	40	35	30	0.25	0.25	0.25

TABLA IV PARAMETROS DE RECUPERACION EN INYECCION CONTINUA DE VAPOR SEGUN EL NPC.

SEGUN : NPC	
VISCOSIDAD	FACTOR DE CAPTURA
$u < 20$ cp	1
$20 < u < 100$	2
$100 < u < 1,000$	4
$u > 1,000$	6



TABLA V FACTORES EMPIRICOS DE CAPTURA SEGUN EL NPC.

## CAPITULO III

### MODELACION

En la presente sección se mostrará en forma sistemática los pasos seguidos por los programas de cómputo en la determinación de :

- a) Pérdidas de calor en superficie
- b) Pérdidas de calor en el pozo
- c) Pérdidas de calor en la formación y recuperación de petróleo, de un pozo sometido a inyección continua de vapor.

#### 3.1 DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL.

A continuación se deducirá el coeficiente de transferencia de calor total con respecto a algún área característica de los siguientes sistemas :

- a) Tubería superficial desnuda
- b) Tubería superficial aislada
- c) Tubería de producción desnuda
- d) Tubería de producción aislada

Ya que trataremos con flujo radial, el área expuesta a transferencia de calor no es constante, sin embargo el  $q$  total si lo es, puesto que se consideran condiciones de flujo continuo.

a) TUBERIA SUPERFICIAL DESNUDA :

En el sistema representado en la Fig. N° 1.6, los mecanismos de transferencia de calor actuando son:

- Del vapor en movimiento hacia la tubería superficial existe convección, por lo que la tasa de flujo de calor viene dado por :

$$q_{cis} = h_{cis} (2\pi r_i L) (T_v - T_i) \quad (3.1)$$

donde:

$T_i$  = Temperatura de la superficie interior de la tubería superficial, °F.

- A través de la tubería superficial existe conducción, luego :

$$q_{us} = K_{ac} (2\pi L) (T_i - T_e) / \ln(r_e / r_i) \quad (3.2)$$

Esta ecuación es obtenida integrando la ecuación (1.50) y en la cual  $A=2\pi rL$

- De la tubería superficial hacia el ambiente existe convección y radiación, luego :

$$\begin{aligned}
 q_{ces, res} &= q_{ces} + q_{res} = \\
 &= h_{ces} (2\pi r_e L) (T_e - T_{amb}) + h_{res} (2\pi r_e L) (T_e - T_{amb}) \\
 &= (h_{ces} + h_{res}) (2\pi r_e L) (T_e - T_{amb}) \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

$$\text{Si: } (T_v - T_{amb}) = (T_v - T_i) + (T_i - T_e) + (T_e - T_{amb})$$

Reemplazando los 3 términos del lado derecho de la ecuación anterior por (3.1), (3.2), (3.3), se tendrá :

$$(T_v - T_{amb}) = \frac{q_{cis}}{h_{cis} (2\pi r_i L)} + \frac{q_{us} \ln(r_e/r_i)}{K_{ac} (2\pi L)} + \frac{q_{ces, res}}{(h_{ces} + h_{res}) (2\pi r_e L)} \quad (3.4)$$

Si consideramos que las temperaturas de los cuerpos formadores del sistema descrito no cambian con tiempo, el proceso ocurrirá bajo condiciones de flujo continuo de calor, es decir :

$$q_{cis} = q_{us} = q_{ces, res} = q_s$$

donde:

$q_s$  = Tasa de flujo de calor total en la tubería superficial desnuda, Btu/hr

BIBLIOTECA



FACULTAD DE ING.  
CIENCIAS DE LA TIERRA

Por tanto (3.4) quedará :

$$(T_v - T_{amb}) = \frac{q_s}{2\pi L} \cdot \left[ \frac{1}{r_i h_{cis}} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{K_{ac}} + \frac{1}{r_e (h_{ces} + h_{res})} \right] \quad (3.5)$$

Si aplicamos (1.55) a nuestro sistema y si consideramos como área característica el área exterior de la tubería superficial, entonces :

$$h_s = \frac{q_s/2\pi r_e L}{(T_v - T_{amb})} \quad (3.6)$$

Reemplazando (3.5) en (3.6) se tendrá :

$$h_s = \frac{q_s/2\pi r_e L}{q_s/2\pi L} \cdot \left[ \frac{1}{r_i h_{cis}} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{K_{ac}} + \frac{1}{r_e (h_{ces} + h_{res})} \right]^{-1}$$

Simplificando y arreglando se tendrá :

$$h_s = \left[ \frac{r_e}{r_i h_{cis}} + \frac{r_e \ln(r_e/r_i)}{K_{ac}} + \frac{1}{h_{ces} + h_{res}} \right]^{-1} \quad (3.7)$$

Nótese que, todas las variables ya fueron definidas en 1.3.3 sección A.

#### b) TUBERIA SUPERFICIAL AISLADA :

En el sistema representado en la Fig. N° 1.7, los mecanismos de transferencia de calor actuando son:

- Del vapor en movimiento hacia la tubería superficial existe convección, por lo que la tasa de flujo de calor viene dado por :

$$q_{cis} = h_{cis} (2\pi r_i L) (T_v - T_i) \quad (3.8)$$

- A través de la tubería superficial existe conducción, luego :

$$q_{us} = K_{ac} (2\pi L) (T_i - T_e) / \ln(r_e / r_i) \quad (3.9)$$

- A través del aislante existe conducción, luego:

$$q_{uais} = K_{ais} (2\pi L) (T_e - T'_e) / \ln(r_{ais} / r_e) \quad (3.10)$$

- Del aislante hacia el ambiente existe convección y radiación, luego :

$$\begin{aligned} q'_{ces, res} &= q'_{ces} + q'_{res} \\ &= h'_{ces} (2\pi r_{ais} L) (T'_e - T_{amb}) + h'_{res} (2\pi r_{ais} L) (T'_e - T_{amb}) \\ &= (h'_{ces} + h'_{res}) (2\pi r_{ais} L) (T'_e - T_{amb}) \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\text{Si: } (T_v - T_{amb}) = (T_v - T_i) + (T_i - T_e) + (T_e - T'_e) + (T'_e - T_{amb})$$

Reemplazando los cuatro términos del lado derecho de la ecuación anterior, por (3.8), (3.9),



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

(3.10) y (3.11) se tendrá :

$$(T_v - T_{amb}) = \frac{q_{cis}}{h_{cis}(2\pi r_i L)} + \frac{q_{us} \ln(r_e/r_i)}{K_{ac}(2\pi L)} + \frac{q_{uais} \ln(r_{ais}/r_e)}{K_{ais}(2\pi L)} + \frac{q'_{ces, res}}{(h'_{ces} + h'_{res})(2\pi r_{ais} L)} \quad (3.12)$$

Si consideramos que las temperaturas de los cuerpos formadores del sistema descrito no cambian con tiempo, el proceso ocurrirá bajo condiciones de flujo continuo de calor, es decir :

$$q_{cis} = q_{us} = q_{uais} = q'_{ces, res} = q'_s$$

donde:

$q'_s$  = Tasa de flujo de calor total en la tubería superficial aislada, Btu/hr.

Por tanto (3.12) quedará :

$$(T_v - T_{amb}) = \frac{q'_s}{2\pi L} \left[ \frac{1}{r_i h_{cis}} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{K_{ac}} + \frac{\ln(r_{ais}/r_e)}{K_{ais}} + \frac{1}{r_{ais}(h'_{ces} + h'_{res})} \right] \quad (3.13)$$

Si aplicamos (1.55) a nuestro sistema y si consideramos como área característica el área exte-



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



rior del aislante, entonces :

$$h'_S = \frac{q'_S / 2\pi r_{ais} L}{(T_v - T_{amb})} \quad (3.14)$$

Reemplazando (3.13) en (3.14) se tendrá :

$$h'_S = \frac{q'_S / 2\pi r_{ais} L}{q'_S / 2\pi L} \left[ \frac{1}{r_i h'_{cis}} + \frac{\ln(r_e / r_i)}{K_{ac}} + \frac{\ln(r_{ais} / r_e)}{K_{ais}} + \frac{1}{r_{ais} (h'_{ces} + h'_{res})} \right]^{-1}$$

Simplificando y arreglando se tendrá :

$$h'_S = \left[ \frac{r_{ais}}{r_i h'_{cis}} + \frac{r_{ais} \ln(r_e / r_i)}{K_{ac}} + \frac{r_{ais} \ln(r_{ais} / r_e)}{K_{ais}} + \frac{1}{h'_{ces} + h'_{res}} \right]^{-1} \quad (3.15)$$

Nótese que todas las variables ya fueron definidas en 1.3.3 sección B.

### c) TUBERIA DE PRODUCCION DESNUDA :

En el sistema representado en la Fig. N° 1.9, los mecanismos de transferencia de calor actuando son:

- Del vapor en movimiento hacia la tubería de producción existe convección, por lo que la tasa de flujo de calor viene dado por :

$$q_{cip} = h_{cip} (2\pi r_{ti} L_p) (T_v - T_{ti}) \quad (3.16)$$

- A través de la tubería de producción existe conducción, luego :

$$q_{up} = K_{ac} (2\pi L_p) (T_{ti} - T_{to}) / \ln(r_{to}/r_{ti}) \quad (3.17)$$

- De la tubería de producción hacia la tubería de revestimiento existe convección y radiación, luego :

$$\begin{aligned} q_{cep,rep} &= q_{cep} + q_{rep} \\ &= h_{cep} (2\pi r_{to} L_p) (T_{to} - T_{ci}) + h_{rep} (2\pi r_{to} L_p) (T_{to} - T_{ci}) \\ &= (h_{cep} + h_{rep}) (2\pi r_{to} L_p) (T_{to} - T_{ci}) \quad (3.18) \end{aligned}$$

- A través de la tubería de revestimiento existe conducción, luego :

$$q_{ucas} = K_{ac} (2\pi L_p) (T_{ci} - T_{co}) / \ln(r_{co}/r_{ci}) \quad (3.19)$$

- A través de la capa de cemento existe conducción, luego :

$$q_{cem} = K_{cem} (2\pi L_p) (T_{co} - T_h) / \ln(r_h/r_{co}) \quad (3.20)$$

$$\text{Si: } (T_v - T_h) = (T_v - T_{ti}) + (T_{ti} - T_{to}) + (T_{to} - T_{ci}) + (T_{ci} - T_{co}) + \\ + (T_{co} - T_h)$$

Reemplazando los 5 términos del lado derecho de la ecuación anterior por (3.16), (3.17), (3.18), (3.19) y (3.20), se tendrá :

$$(T_v - T_h) = \frac{q_{cip}}{h_{cip} (2\pi r_{ti} L_p)} + \frac{q_{up} \ln(r_{to}/r_{ti})}{K_{ac} (2\pi L_p)} + \frac{q_{cep, rep}}{(h_{cep} + h_{rep}) (2\pi r_{to} L_p)} \\ + \frac{q_{ucas} \ln(r_{co}/r_{ci})}{K_{ac} (2\pi L_p)} + \frac{q_{cem} \ln(r_h/r_{co})}{K_{cem} (2\pi L_p)} \quad (3.21)$$

Si consideramos que las temperaturas de los cuerpos formadores del sistema descrito no cambian con tiempo, el proceso ocurrirá bajo condiciones de flujo continuo de calor, es decir :

$$q_{cip} = q_{up} = q_{cep, rep} = q_{ucas} = q_{cem} = q_p$$

donde:

$q_p$  = Tasa de flujo de calor total en la tubería de producción desnuda, Btu/hr.

Por tanto (3.21) quedará :



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$(T_v - T_h) = \frac{q_p}{2\pi L_p} \left[ \frac{1}{r_{ti} h_{cip}} + \frac{\ln(r_{to}/r_{ti})}{K_{ac}} + \frac{1}{r_{to} (h_{cep} + h_{rep})} + \frac{\ln(r_{co}/r_{ci})}{K_{ac}} + \frac{\ln(r_h/r_{co})}{K_{cem}} \right] \quad (3.22)$$

Si aplicamos (1.55) a nuestro sistema y si consideramos como área característica el área exterior de la tubería de producción, entonces :

$$h_p = \frac{q_p / 2\pi r_{to} L_p}{(T_v - T_h)} \quad (3.23)$$

Reemplazando (3.22) en (3.23) se tendrá :

$$h_p = \frac{q_p / 2\pi r_{to} L_p}{q_p / 2\pi L_p} \left[ \frac{1}{r_{ti} h_{cip}} + \frac{\ln(r_{to}/r_{ti})}{K_{ac}} + \frac{1}{r_{to} (h_{cep} + h_{rep})} + \frac{\ln(r_{co}/r_{ci})}{K_{ac}} + \frac{\ln(r_h/r_{co})}{K_{cem}} \right]^{-1}$$

Simplificando y arreglando se tendrá :

$$h_p = \left[ \frac{r_{to}}{r_{ti} h_{cip}} + \frac{r_{to} \ln(r_{to}/r_{ti})}{K_{ac}} + \frac{1}{(h_{cep} + h_{rep})} + \frac{r_{to} \ln(r_{co}/r_{ci})}{K_{ac}} + \frac{r_{to} \ln(r_h/r_{co})}{K_{cem}} \right]^{-1} \quad (3.24)$$

Nótese que todas las variables ya fueron definidas en 1.3.6 sección A.

d) TUBERIA DE PRODUCCION AISLADA :

En el sistema representado en la Fig. N° 1.10, los mecanismos de transferencia de calor actuando son:

- Del valor en movimiento hacia la tubería de producción existe convección, por lo que la tasa de flujo de calor viene dado por :

$$q_{cip} = h_{cip} (2\pi r_{ti} L_p) (T_v - T_{ti}) \quad (3.25)$$

- A través de la tubería de producción existe conducción, luego :

$$q_{up} = K_{ac} (2\pi L_p) (T_{ti} - T_{to}) / \ln(r_{to}/r_{ti}) \quad (3.26)$$

- A través del aislante existe conducción, luego:

$$q_{uais} = K_{ais} (2\pi L_p) (T_{to} - T_{ais}) / \ln(r_{ais}/r_{to}) \quad (3.27)$$

- Del aislante hacia la tubería de revestimiento existe convección y radiación, luego :



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$\begin{aligned}
 q'_{cep, rep} &= q'_{cep} + q'_{rep} \\
 &= h'_{cep} (2\pi r_{ais} L_p) (T_{ais} - T_{ci}) + h'_{rep} (2\pi r_{ais} L_p) (T_{ais} - T_{ci}) \\
 &= (h'_{cep} + h'_{rep}) (2\pi r_{ais} L_p) (T_{ais} - T_{ci}) \quad (3.28)
 \end{aligned}$$

- A través de la tubería de revestimiento existe conducción, luego :

$$q_{ucas} = K_{ac} (2\pi L_p) (T_{ci} - T_{co}) / \ln(r_{co}/r_{ci}) \quad (3.29)$$

- A través de la capa de cemento existe conducción, luego :

$$q_{cem} = K_{cem} (2\pi L_p) (T_{co} - T_h) / \ln(r_h/r_{co}) \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Si: } (T_v - T_h) &= (T_v - T_{ti}) + (T_{ti} - T_{to}) + (T_{to} - T_{ais}) + (T_{ais} - T_{ci}) + \\
 &\quad + (T_{ci} - T_{co}) + (T_{co} - T_h)
 \end{aligned}$$

Reemplazando los 5 términos del lado derecho de la ecuación anterior por: (3.25), (3.26), (3.27), (3.28), (3.29), (3.30) se tendrá :

$$\begin{aligned}
 (T_v - T_h) &= \frac{q_{cip}}{h_{cip} (2\pi r_{ti} L_p)} + \frac{q_{up} \ln(r_{to}/r_{ti})}{K_{ac} (2\pi L_p)} + \frac{q_{uais} \ln(r_{co}/r_{ci})}{K_{ais} (2\pi L_p)} + \\
 &\quad + \frac{q'_{cep, rep}}{(h'_{cep} + h'_{rep}) (2\pi r_{ais} L_p)} + \frac{q_{ucas} \ln(r_{co}/r_{ci})}{K_{ac} (2\pi L_p)} + \frac{q_{cem} \ln(r_h/r_{co})}{K_{cem} (2\pi L_p)} \quad (3.31)
 \end{aligned}$$



Si consideramos que las temperaturas de los cuerpos formadores del sistema descrito no cambian con tiempo, el proceso ocurrirá bajo condiciones de flujo continuo de calor, es decir :

$$q_{cip} = q_{up} = q_{uais} = q'_{cep,rep} = q_{ucas} = q_{cem} = q'_p$$

donde:

$q'_p$  = Tasa de flujo de calor total en la tubería de producción aislada, Btu/hr.

Por tanto (3.31) quedará :

$$(T_v - T_h) = \frac{q'_p}{2\pi L_p} \left[ \frac{1}{r_{ti} h'_{cip}} + \frac{\ln(r_{to}/r_{ti})}{K_{ac}} + \frac{\ln(r_{ais}/r_{to})}{K_{ais}} + \frac{1}{r_{ais} (h'_{cep} + h'_{rep})} + \frac{\ln(r_{co}/r_{ci})}{K_{ac}} + \frac{\ln(r_h/r_{co})}{K_{cem}} \right] \quad (3.32)$$

Si aplicamos (1.55) a nuestro sistema y si consideramos como área característica el área exterior de la tubería de producción, entonces

$$h'_p = \frac{q'_p / 2\pi r_{to} L_p}{(T_v - T_h)} \quad (3.33)$$



BIBLIOTECA FIC (3.33)  
ESPOL

Reemplazando (3.32) en (3.33) se tendrá :

$$h'_p = \frac{q'_p/2\pi r_{to} L_p}{q'_p/2\pi L_p} \left[ \frac{1}{r_{ti} h'_{cip}} + \frac{\ln(r_{to}/r_{ti})}{K_{ac}} + \frac{\ln(r_{ais}/r_{to})}{K_{ais}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{r_{ais} (h'_{cep} + h'_{rep})} + \frac{\ln(r_{co}/r_{ci})}{K_{ac}} + \frac{\ln(r_h/r_{co})}{K_{cem}} \right]^{-1}$$

Simplificando y arreglando se tendrá :

$$h'_p = \left[ \frac{r_{to}}{r_{ti} h'_{cip}} + \frac{r_{to} \ln(r_{to}/r_{ti})}{K_{ac}} + \frac{r_{to} \ln(r_{ais}/r_{to})}{K_{ais}} + \right. \\ \left. + \frac{r_{to}}{r_{ais} (h'_{cep} + h'_{rep})} + \frac{r_{to} \ln(r_{co}/r_{ci})}{K_{ac}} + \frac{r_{to} \ln(r_h/r_{co})}{K_{cem}} \right]^{-1}$$

(3.34)

Nótese que todas las variables ya fueron definidas en 1.3.6 sección b.

### 3.2 CALCULO DE PERDIDAS DE CALOR EN LINEAS SUPERFICIALES, POZO Y FORMACION-DETERMINACION DEL RECOBRO DE PETROLEO vs TIEMPO.

- CALCULO DE PERDIDAS DE CALOR EN LINEAS SUPERFICIALES :

El modelo de cálculo de pérdidas de calor en lí-



neas superficiales aplicado al programa (INVASU.BAS) consta del siguiente procedimiento matemático.

a) PARA LINEAS SUPERFICIALES DESNUDAS :

Considerando el sistema de la siguiente figura:

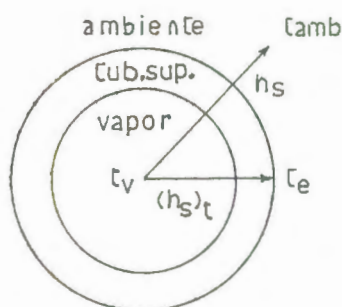


Fig. N° 3.1 RELACION ENTRE EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL  $(h_s)$  Y EL QUE ACTUA HASTA LA SUPERFICIE EXTERIOR DE LA TUBERIA SUPERFICIAL DESNUDA  $(h_s)_T$  .

- i. Suponer un valor  $T_e$  partiendo de la temperatura de saturación del vapor a la salida del generador y calcular :

HRES mediante la ecuación (1.59), y

HCES mediante la ecuación (1.61) ó (1.62).

- ii. Calcular el valor de  $h_s$  mediante la ecuación (1.58).

- iii. Calcular el valor de  $(h_s)_T$  usando  $h_s$  excluyendo



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

$h_{ces}$  y  $h_{res}$ . Nótese que  $(h_s)_T$  es el coeficiente de transferencia de calor hasta la superficie exterior de la tubería superficial desnuda o es el coeficiente de transferencia de calor total en el sistema de tubería superficial desnuda excluyendo  $h_{res}$  y  $h_{ces}$ .

- iv. Dado que  $q_s$  es constante en el sistema descrito, se puede establecer que las pérdidas de calor hasta la superficie exterior de la tubería superficial desnuda, está dada por :

$$q_s = (h_s)_T \cdot A_{es} \cdot (T_v - T_e) \quad (3.35)$$

del cual se obtiene :

$$T_e = T_v - \frac{q_s}{(h_s)_T \cdot A_{es}} \quad (3.36)$$

Y si las pérdidas de calor total en el sistema tubería superficial desnuda, está dada por la ecuación (1.56) o sea :

$$q_s = h_s \cdot A_{es} \cdot (T_v - T_{amb})$$

Entonces (1.56) en (3.36) dará :

$$T_e = T_v - \frac{h_s \cdot A_{es} \cdot (T_v - T_{amb})}{(h_s)_T \cdot A_{es}}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Simplificando tendremos :

$$T_e = T_v - \frac{h_s (T_v - T_{amb})}{(h_s)_T} \quad (3.37)$$

De lo antes expuesto se concluye :

"Calcular el valor de  $T_e$  utilizando (3.37)".

- v. Comparar el valor de  $T_e$  calculado según (3.37) con el valor de  $T_e$  supuesto en el paso i. anterior, y :

Si no son iguales dentro de una tolerancia de aproximación, repetir el procedimiento desde el primer paso, utilizando el  $T_e$  calculado como el nuevo valor supuesto hasta lograr que se igualen, es decir se utiliza el método de ensayo y error.

Si son iguales, considerar este  $T_e$  supuesto como el valor  $T_e$  buscado, luego los valores  $h_{ces}$ ,  $h_{ces}$  y  $h_s$  calculados a este  $T_e$  supuesto serán los valores buscados para el cálculo de XWH.



BIBLIOTECA FIC1  
ESPOL

- b) PARA LINEAS SUPERFICIALES AISLADAS :

Considerando el sistema de la siguiente figura:

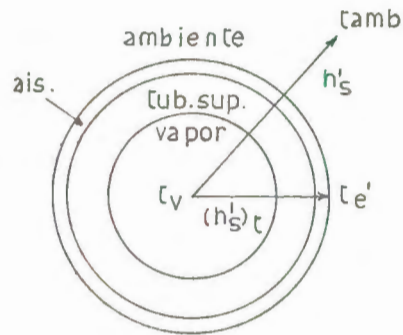


Fig. N° 3.2 RELACION ENTRE EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL ( $h'_s$ ) Y EL QUE ACTUA HASTA LA SUPERFICIE EXTERIOR DE LA TUBERIA SUPERFICIAL AISLADA ( $h'_s$ )<sub>T</sub> .

- i. Suponer un valor  $T'_e$  partiendo de la temperatura de saturación del vapor a la salida del generador y calcular :

$h'_{res}$  mediante la ecuación (1.71) y

$h'_{ces}$  mediante la ecuación (1.73) ó (1.74)

- ii. Calcular el valor de  $h'_s$  mediante la ecuación (1.70).
- iii. Calcular el valor de  $(h'_s)_T$  usando  $h'_s$  excluyendo  $h'_{ces}$  y  $h'_{res}$ .

Nótese que  $(h'_s)_T$  es el coeficiente de transfe-

rencia de calor hasta la superficie exterior de la tubería superficial aislada o es el coeficiente de transferencia de calor total en el sistema tubería superficial aislada excluyendo  $h'_{res}$  y  $h'_{ces}$ .

- iv. Dado que  $q'_s$  es constante en el sistema descrito, se puede establecer que las pérdidas de calor hasta la superficie exterior de la tubería superficial aislada está dada por :

$$q'_s = (h'_s)_T \cdot A'_{es} \cdot (T_v - T'_e) \quad (3.38)$$

del cual se obtiene :

$$T'_e = T_v - \frac{q'_s}{(h'_s)_T \cdot A'_{es}} \quad (3.39)$$

Y si las pérdidas de calor total en el sistema tubería superficial aislada, está dada por la ecuación (1.68) o sea :

$$q'_s = h'_s \cdot A'_{es} \cdot (T_v - T_{amb})$$

Entonces (1.68) en (3.39) dará :

$$T'_e = T_v - \frac{h'_s A'_{es} (T_v - T_{amb})}{(h'_s)_T \cdot A'_{es}}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Simplificando tendremos :

$$T'_e = T_v - \frac{h'_s(T_v - T_{amb})}{(h'_s)_T} \quad (3.40)$$

De lo antes expuesto se concluye :

"Calcular el valor de  $T'_e$  utilizando (3.40)".

- v. Comparar el valor de  $T'_e$  calculado según (3.40) con el valor de  $T'_e$  supuesto en el paso "i" anterior, y :

Si no son iguales dentro de una tolerancia de aproximación, repetir el procedimiento desde el primer paso, utilizando el  $T'_e$  calculado como el nuevo valor supuesto hasta lograr que se igualen, es decir se utiliza el método de ensayo y error.

Si son iguales. considerar ese  $T'_e$  supuesto como el valor  $T'_e$  buscado, luego los valores  $h'_{res}$ ,  $h'_{ces}$  y  $h'_s$  calculados a este  $T'_e$  supuesto serán los valores buscados para el cálculo de  $q'_s$  y  $XWH'$ .

### 3.2.2 CALCULO DE PERDIDAS DE CALOR EN EL POZO :

El modelo de cálculo de pérdidas de calor en el pozo aplicado al programa (INVAPO.BAS) consta del siguiente procedimiento matemático :

#### a) PARA POZOS CON TUBERIA DE PRODUCCION DESNUDA :

Antes de establecer el procedimiento seguido por el modelo para pozos con tubería de producción desnuda del programa (INVAPO.BAS), veremos la procedencia de las fórmulas utilizadas.

Considerando el sistema de la Fig. N° 1.9 tendremos que:

Se asumirá despreciables el efecto de los términos que contienen  $h_{cip}$  y  $K_{ac}$  de la ecuación quedando :

$$h_p = \left[ \frac{1}{(h_{cep} + h_{rep})} + \frac{r_{to} \ln(r_h/r_{co})}{K_{cem}} \right] \quad (3.41)$$

La tasa de transferencia de calor desde el interior de la tubería de producción hasta la interfase cemento-formación puede evaluarse mediante la ecuación (1.85), y en vista que el valor de  $T_h$  no se conoce, es necesario considerar la transferen-



cia de calor hacia la formación, para así relacionarla con la temperatura de formación en una zona alejada del pozo, de esta manera se establece la transferencia de calor del cemento a la formación, en el cual el flujo es no continuo y se hace necesario resolver la ecuación de difusión :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{D} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.42)$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

A fin de determinar la distribución de temperatura, RAMEG resolvió la ecuación (3.42) para obtener la distribución de temperatura en función de  $r$  y  $t$ , una vez sustituida esta solución en las operaciones indicadas por (3.42) se obtiene la ecuación para calcular la tasa de transferencia de calor entre la interfase cemento-formación y la formación, es decir :

$$q_p = \frac{2\pi L_p K_t (T_h - T_t)}{f(t)} ; \text{ en } \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \quad (3.43)$$

donde:

$K_t$  = Conductividad térmica de la tierra, (Btu/hr-pie-°F).

$T_t$  = Temperatura de la tierra, (°F).

Este valor está dado por:

$$T_t = (T_{\text{amb}} + T_y) / 2$$



$$f(t) = \ln \left[ \frac{2 \sqrt{D_t \cdot t}}{r_h} \right] - 0.29 \quad (3.44)$$

donde:

$D_t$  = Difusividad térmica de la tierra, pie<sup>2</sup>/hora.

$t$  = Tiempo de inyección, horas

$r_h$  = Radio del hueco del pozo, pies.

Nótese que la ecuación (3.44) sólo es válida para tiempos mayores de 7 días, además consideramos el término tierra para referirnos a las formaciones que rodean el pozo en un punto alejado y no a la formación petrolífera de interés.

Ahora, la ecuación que considera la tasa de transferencia de calor a través del cemento, viene dada por :

$$q_p = \frac{2\pi K_{cem} L_p (T_{co} - T_h)}{\ln(r_h/r_{co})} ; \text{ en } \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \quad (3.45)$$

Ya que la transferencia de calor ocurre en un sistema en serie, éste es constante a lo largo del sistema, lo mismo ocurrirá con la tasa de transferencia de calor, por tanto :

Igualando las ecuaciones (1.85) y (3.43) se tendrá :



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$2\pi r_{to} L_p h_p \cdot (T_v - T_h) = \frac{2\pi L_p K_t (T_h - T_t)}{f(t)}$$

Simplificando y arreglando se obtendrá :

$$T_h = \frac{T_v f(t) + (K_t / r_{to} h_p) \cdot T_t}{f(t) + \frac{K_t}{r_{to} h_p}} \quad (3.46)$$

De la misma manera igualando (1.85) con (3.45) se tendrá :

$$2\pi r_{to} L_p \cdot h_p \cdot (T_v - T_h) = \frac{2\pi K_{cem} L_p (T_{co} - T_h)}{\ln(r_h / r_{co})}$$

Simplificando y arreglando se obtendrá :

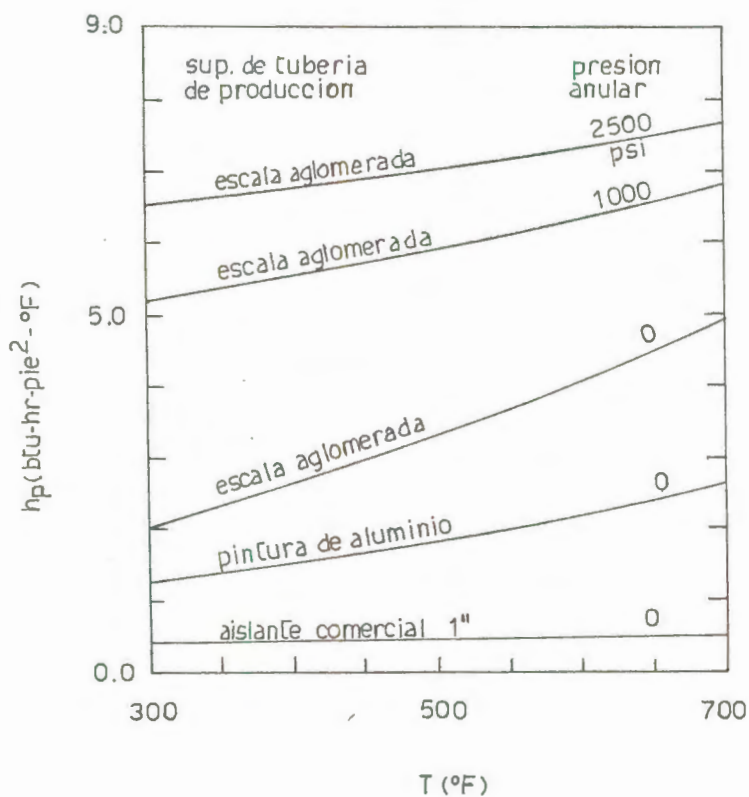
$$T_{co} = T_h + \frac{r_{to} h_p (T_v - T_h) \ln(r_h / r_{co})}{K_{cem}}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

El procedimiento iterativo para evaluar  $h_p$  y  $q_p$  para el caso tubería de producción desnuda, es el siguiente :

- i. Suponer un valor de  $h_p$ , partiendo del valor obtenido de la curva para ESCALA AGLOMERADA y presión anular cero psi en tubería de producción de 27/8 pulgadas con tubería de revestimiento de 7 pulgadas, según lo muestra la Figura N° 3.3.



BIBLIOTECA H  
ESPOL

Fig. N° 3.3 VARIACION DE  $h_p$  VERSUS TEMPERATURA DE LA TUBERIA DE PRODUCCION DE 2  $\frac{7}{8}$  PULGADAS CON TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE 7 PULGADAS.

- ii. Utilizando el  $h_p$  anterior evaluar  $T_h$  mediante (3.46).
- iii. Con el  $T_h$  anterior evaluar  $T_{co}$  mediante (3.47).
- iv. Puesto que  $T_{to} \approx T_v$  y  $T_{ci} \approx T_{co}$ , evaluar  $h_{rep}$  y  $h_{cep}$  mediante (1.88) y (1.90).
- v. Evaluar  $h_p$  mediante (3.41) y comparar este  $h_p$  calculado con el  $h_p$  supuesto en "i" y :

BIBLIOTECA

FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Si no son iguales dentro de una tolerancia de aproximación, repetir el procedimiento desde el primer paso "i" utilizando el  $h_p$  calculado como el nuevo valor supuesto hasta lograr que se igualen.

Si son iguales, considerar ese  $h_p$  supuesto como el valor  $h_p$  buscado, luego los valores  $h_{rep}$ ,  $h_{cep}$  y  $h_p$  calculados a este  $h_p$  supuesto serán los valores buscados para el cálculo de  $q_p$  y  $X_f$ .



b) PARA POZOS CON TUBERIA DE PRODUCCION AISLADA **BIBLIOTECA FICT ESPOL**

Antes de establecer el procedimiento seguido por el modelo para pozos con tubería de producción aislada del programa (INVAPO.BAS), veremos la pro-

cedencia de las fórmulas utilizadas.

Considerando el sistema de la Fig. N° 1.10, y asumiendo que el cemento está ocupado por tierra tendremos que :

Se utilizará la ecuación (3.34) para el cálculo de  $h'_p$ , pero se supondrá despreciable el efecto de los términos conteniendo  $h'_{cip}$  y  $K_{ac}$ , además se supondrá que el cemento tiene iguales propiedades térmicas que la tierra por lo que se tomará al cemento como parte de la formación lo que hace que el término que contiene a  $K_{cem}$  desaparezca en la ecuación (3.34), y a la vez hace que  $T_h$  ya no exista en la ecuación (1.93) sino el valor  $T_{co}$ .

De lo antes expuesto las expresiones para  $h'_p$  y  $q'_p$  se simplifican en :

$$h'_p = \left[ \frac{r_{to} \ln(r_{ais}/r_{to})}{K_{ais}} + \frac{r_{to}}{r_{ais}(h'_{cep} + h'_{rep})} \right]^{-1}$$

$$q'_p = 2\pi r_{to} L_p \cdot h'_p \cdot (T_v - T_{co}) \quad (3.49)$$

En esta sección, la ecuación (3.43) para la tasa de transferencia de calor entre la interfase cemento-formación y la formación, se modifica para que represente la tasa de transferencia de calor



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

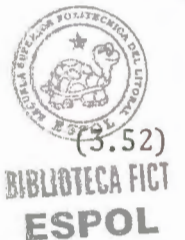
desde el exterior del revestidor hacia la tierra ya que se ha supuesto que  $K_{cem} = K_t$  es decir se ha supuesto que sólo existe tierra en donde anteriormente se consideró cemento y luego tierra, por tanto :

$$q'_p = \frac{2\pi K_t L_p (T_{co} - T_t)}{f(t)} ; \text{ en } \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \quad (3.50)$$

$$\text{siendo } f(t) = \ln \left[ \frac{2 \sqrt{D_t \cdot t}}{r_{co}} \right] - 0.29 \quad (3.51)$$

Ya que la temperatura del aislante es necesario para evaluar  $h'_{cep}$  y  $h'_{rep}$ , entonces se hace necesario considerar la tasa de transferencia de calor a través del aislante mediante la siguiente expresión :

$$q'_p = \frac{2\pi K_{ais} \cdot L_p (T_{to} - T_{ais})}{\ln(r_{ais}/r_{to})} ; \text{ en } \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \quad (3.52)$$



Nótese en esta ecuación que si se basa en la suposición inicial de que  $h_{cip}$  y  $K_{ac}$  son muy grandes, es decir vuelven despreciables a sus inversos usados en la ecuación (3.34) entonces :

$T_v \approx T_{ti} \approx T_{to}$  por lo que en (3.52) se usará  $T_v$  en vez de  $T_{to}$ .

Dado que el valor de  $q'_p$  expresado en las ecuaciones (3.49), (3.50) y (3.52) es el mismo a cualquier tiempo, debido al sistema en serie considerado, se tiene :

Igualando (3.49) con (3.50)

$$2\pi r_{to} L_p h'_p (T_V - T_{co}) = \frac{2\pi K_t L_p (T_{co} - T_t)}{f(t)}$$

Simplificando y arreglando se obtendrá :

$$T_{co} = \frac{K_t T_t / f(t) + r_{to} h'_p T_V}{r_{to} h'_p + K_t / f(t)} \quad (3.53)$$

De la misma manera, igualando (3.49) con (3.52) donde  $T_{to} = T_V$ , tendremos :

$$2\pi r_{to} L_p h'_p (T_V - T_{co}) = \frac{2\pi K_{ais} L_p (T_V - T_{ais})}{\ln(r_{ais} / r_{to})}$$

Simplificando y arreglando se obtendrá :

$$T_{ais} = T_V - \frac{r_{to} h'_p (T_V - T_{co}) \ln(r_{ais} / r_{to})}{K_{ais}} \quad (3.54)$$

en el cual, al reemplazar  $T_{co}$  por la ecuación (3.53), se transforma en :

$$T_{ais} = T_V - \frac{r_{to} h'_p \ln(r_{ais} / r_{to})}{K_{ais}} \left[ T_V - \frac{K_t T_t / f(t) + r_{to} h'_p T_V}{r_{to} h'_p + K_t / f(t)} \right] \quad (3.55)$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



Finalmente al igualar (3.50) con (3.52) se tendrá:

$$\frac{2\pi K_t L_p (T_{co} - T_t)}{f(t)} = \frac{2\pi K_{ais} L_p (T_{to} - T_{ais})}{\ln(r_{ais}/r_{to})}$$

Simplificando y arreglando se obtendrá :

$$T_{co} = T_t + \frac{K_{ais} f(t) (T_{to} - T_{ais})}{K_t \ln(r_{ais}/r_{to})} \quad (3.56)$$

El procedimiento iterativo para evaluar  $h'_p$  y  $q'_p$  para el caso tubería de producción con aislante, es el siguiente :

- i. Suponer un valor de  $h'_p$ , partiendo del **valor** obtenido de la curva para "AISLANTE COMERCIAL DE 1" y presión anular cero psi en tubería de producción de 2-7/8 con tubería de revestimiento de 7 pulgadas según lo muestra la figura N° 3.3.
- ii. Utilizando el  $h'_p$  anterior evaluar  $T_{ais}$  mediante (3.55).
- iii. Con el  $T_{ais}$  anterior y puesto que  $T_{to} \approx T_v$ , evaluar  $T_{co}$  mediante (3.56).





- iv. Puesto que  $T_{ci} \approx T_{co}$  y  $T'_{anu} = (T_{ais} + T_{ci})/2$  evaluar  $h'_{rep}$  y  $h'_{cep}$  mediante (1.95) y (1.97).
- v. Evaluar  $h'_p$  mediante (3.48), y comparar este  $h'_p$  calculado con el  $h'_p$  supuesto en "i" y :

Si no son iguales dentro de una tolerancia de aproximación, repetir el procedimiento desde el primer paso "i" utilizando el  $h'_p$  calculado como el nuevo valor supuesto hasta lograr que se igualen.

Si son iguales, considerar ese  $h'_p$  supuesto como el valor  $h'_p$  buscado, luego los valores  $h'_{rep}$ ,  $h'_{cep}$  y  $h'_p$  calculados a este  $h'_p$  supuesto serán los valores buscados para el cálculo de  $X'_f$ .



### 3.2.3 CALCULO DE PERDIDAS DE CALOR EN LA FORMACION Y DETERMINACION DEL RECOBRO DE PETROLEO vs. TIEMPO

El modelo de cálculo de pérdidas de calor en la formación y recuperación de petróleo vs. tiempo aplicado al programa (INVAFO.BAS), consta del siguiente procedimiento matemático:

- a) Calcular el término  $e^{t_D^2} \operatorname{erfc} t_D$  al límite económico

representado por  $e^{t_{DL}^2}$  erfc  $t_{DL}$  utilizando la ecuación de la PHILLIPS PETROLEUM Co. dada por :

$$e^{t_{DL}^2} \text{erfc } t_{DL} = (5.618 \times 10^{-6}) \cdot \frac{\text{COV} \cdot M \cdot \Delta T}{\text{COPE} \cdot \phi \cdot (\text{Soi} - \text{Sor})} \quad (3.57)$$

donde:

$(5.618 \times 10^{-6})$  = Factor de conversión dimensional

COV = Costo de generación de vapor, dólares/millón de Btu

M = Capacidad calorífica por unidad de volumen de la formación petrolífera, Btu/pie<sup>3</sup>- °F.

$\Delta T$  = Diferencia entre la temperatura del vapor saturado y la temperatura del yacimiento, °F.

COPE = Costo neto del petróleo desplazado, dólares/barril.

$\phi$  = Porosidad, fracción adimensional

Soi = Saturación de petróleo inicial, fracción adimensional

Sor = Saturación de petróleo residual.

El modelo considera que este término será reemplazado por la saturación de petróleo residual de la zona barrida por vapor y agua caliente, por lo que se toma como buena aproximación el estimado de Lewin y Asociados definida por la saturación de petróleo residual ponderada a la eficiencia volumétrica de la formación barrida por vapor y agua caliente, esto es :

$$\begin{aligned}
 (\text{Sor})_{V,H} &= \sum_{V,H} (\text{Ev} \cdot \text{Sor}) + (1.0 - \sum_{V,H} \text{Ev}) \cdot \text{Soi} \\
 &= (\text{Ev})_V \cdot (\text{Sor})_V + (\text{Ev})_H \cdot (\text{Sor})_H + (1.0 - (\text{Ev})_V - (\text{Ev})_H) \cdot \text{Soi}
 \end{aligned}
 \tag{3.58}$$

donde:

$$(\text{E}_V)_V = (\text{E}_A)_V \cdot (\text{E}_Z)_V$$

$$(\text{E}_Z)_V = (\text{E}_Z/\text{ZONA})_V \cdot Z_P/h$$

siendo:

$$(\text{E}_Z/\text{ZONA})_V = (\text{E}_Z)_V \text{ expresado en pie/zona}$$

$$Z_P = \text{Número de zonas productivas}$$

$$h = \text{Espesor promedio de la formación}$$

Además:

$$(\text{E}_V)_H = (\text{E}_A)_H \cdot (\text{E}_Z)_H$$

$$(\text{E}_Z)_H = 1 - (\text{E}_Z)_V$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

El resto de variables fueron definidas en el Capítulo II.

- b) Con el valor anterior calculado por (3.57) ingresar a la Tabla VI (tabla función error complementario) e interpolar el valor de tiempo adimensional al límite económico representado por  $t_{DL}$ ; a-dimensional.

- c) Con el valor  $e^{t_{DL}^2}$  erfc  $t_{DL}$  calculado en "a" y el valor  $t_{DL}$  calculado en "b", calcular :

$$e^{t_{DL}^2} \operatorname{erfc} t_{DL} + \frac{2t_{DL}}{\pi} - 1 ; \text{ adimensional}$$

- d) Con el valor anterior, calcular el área de formación calentada por el vapor y el agua caliente al límite económico, utilizando la siguiente ecuación :

$$\left[ A(t)_{V,H} \right]_L = \frac{(\dot{Q}_I)_{V,H} \cdot M \cdot h \cdot D_{ob}}{4 K_{ob}^2 \cdot (T_V - T_Y)} \left[ e^{t_{DL}^2} \operatorname{erfc} t_{DL} + \frac{2t_{DL}}{\pi} - 1 \right]; \text{ en pie}^2 \quad (3.59)$$

donde:

$(\dot{Q}_I)_{V,H}$  = Tasa constante de inyección de calor, (Btu/hr)

Este valor está dado por :

$$(\dot{Q}_I)_{V,H} = \dot{m} \cdot L_V \quad (3.60)$$

donde:

$\dot{m}$  = Tasa másica de inyección de vapor saturado, lb/hr.

$L_V$  = Calor disponible de vapor en el generador o calor latente del vapor saturado, Btu/lb.

$h$  = Espesor promedio de la formación, pies.

$D_{ob}, K_{ob}$  = Difusividad y conductividad térmica de las formaciones adyacentes en  $\text{pie}^2/\text{hr}$  y  $\text{Btu}/\text{hr}\text{-pie}\text{-}^\circ\text{F}$

El resto de variables ya han sido definidas.

- e) Con el valor  $t_{DL}$  calculado en "b", calcular el tiempo requerido para alcanzar el límite económi-



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

co representado por  $t_L$ , mediante la siguiente ecuación :

$$t_L = \frac{t_{DL}^2}{\left[ \frac{2K_{ob}}{Mh\sqrt{D_{ob}}} \right]^2} ; \text{ en horas.} \quad (3.61)$$

f) Iniciar un lazo de programa, tomando un valor de  $t \leq t_L$ , en horas.

g) Para el  $t$  anterior, calcular tiempo adimensional, utilizando la ecuación (29) deducida en apéndice y dada por :

$$t_D = \left[ \frac{2K_{ob}}{Mh\sqrt{D_{ob}}} \right] t^{1/2} ; \text{ adimensional} \quad (3.62)$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

h) Para el  $t_D$  anterior, calcular  $e^{t_D^2} \operatorname{erfc} t_D$ , utilizando la siguiente aproximación:

$$e^{t_D^2} \operatorname{erfc} t_D = a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3, \text{ adimensional} \quad (3.63)$$

donde:

$$a_1 = 0.3480242$$

$$a_2 = -0.0958798$$

$$a_3 = 0.7478556$$

$$P = 0.47047$$

$$u = \frac{1}{1 + P \cdot t_D}$$

Nótese que (3.63) fue deducida así :

Si la aproximación de la función error según ABRA MOWITZ y STEGUN está dado por :

$$\operatorname{erf}(t_D) = 1 - (a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3) e^{-t_D^2} \quad (3.64)$$

entonces, la función error complementario, estará dado por :

$$\operatorname{erfc}(t_D) = 1 - \operatorname{erf}(t_D) = (a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3) e^{-t_D^2} \quad (3.65)$$

- i) Con el valor  $t_D$  calculado en "g" y  $e^{t_D^2} \operatorname{erfc} t_D$  calculado en "h", determinar :

$$e^{t_D^2} \operatorname{erfc} t_D + \frac{2t_D}{\sqrt{\pi}} - 1 ; \text{ adimensional}$$

- j) Con el valor calculado en "i", determinar el área de formación calentada por el vapor y el agua caliente mediante la ecuación (31) deducida en apéndice, y dada por :

$$A(t)_{V,H} = \frac{(\dot{Q}_I)_{V,H} \cdot M \cdot h \cdot D_{ob}}{4 K_{ob}^2 (T_V - T_y)} \left[ e^{t_D^2} \operatorname{erfc} t_D + \frac{2}{\sqrt{\pi}} t_D - 1 \right] ;$$

en pie<sup>2</sup>

- k) Con el valor calculado en "h", determinar la variación con tiempo del área de formación calentada por el vapor y el agua caliente; mediante la ecuación (35) deducida en apéndice y dada por :



$$\frac{dA(t)}{dt} \underset{V,H}{=} \frac{(\overset{\circ}{Q}_I)_{V,H}}{M \cdot h \cdot (T_V - T_Y)} e^{t_D^2} \operatorname{erfc} t_D ; \text{ en pie}^2/\text{hr}$$

- l) Con el valor calculado en "i", determinar la recu  
peración acumulada de petróleo al tiempo t corres  
pondiente, considerando sólo el barrido del vapor  
y el agua caliente, mediante la ecuación (2.3).
- m) Con el valor calculado en "h", determinar la tasa  
de producción de petróleo al tiempo t correspon-  
diente, considerando sólo el barrido del vapor y  
el agua caliente, mediante la ecuación (2.12).
- n) Con el valor calculado en "h", determinar la tasa  
de calor utilizado en el calentamiento de la for-  
mación petrolífera al tiempo t correspondiente,  
mediante la ecuación (1.132).
- o) Calcular la tasa de calor perdido hacia las forma-  
ciones adyacentes al tiempo t correspondiente, me-  
diante la siguiente ecuación:

$$\overset{\circ}{Q}_P = \overset{\circ}{Q}_I - \overset{\circ}{Q}_U \quad (3.66)$$

- p) Tomar un nuevo valor de  $t \leq t_L$  y repetir el proce-  
dimiento desde "f" hasta llegar a  $t = t_L$  donde de-  
tengo el programa por cuanto todos los parámetros  
a calcularse para  $t > t_L$  económicamente no son ren-  
tables.



**BIBLIOTECA FICT  
ESPOL**



$x$	$x^2$ e <sup>-x<sup>2</sup></sup> erfc $x$	$x^2$ e <sup>-x<sup>2</sup></sup> erfc $x$ + $2x / (\pi)^{1/2}$ - 1
0.00	1.00000	0.00000
0.02	1.97783	0.00039
0.04	1.95642	0.00155
0.06	1.93574	0.00344
0.08	1.91576	0.00603
0.10	0.89646	0.00929
0.12	0.87779	0.01320
0.14	0.85974	0.01771
0.16	0.84228	0.02282
0.18	0.82538	0.02849
0.20	0.80902	0.03470
0.22	0.79318	0.04142
0.24	0.77784	0.04865
0.26	0.76297	0.05635
0.28	0.74857	0.06451
0.30	0.73460	0.07311
0.32	0.72106	0.08214
0.34	0.70792	0.09157
0.36	0.69517	0.10139
0.38	0.68280	0.11158
0.40	0.67079	0.12214
0.42	0.65912	0.13304
0.44	0.64779	0.14428
0.46	0.63679	0.15584
0.48	0.62609	0.16771
0.50	0.61569	0.17988
0.52	0.60588	0.19234
0.54	0.59574	0.20507
0.56	0.58618	0.21807
0.58	0.57687	0.23133
0.60	0.56780	0.24483
0.62	0.55898	0.25858
0.64	0.55039	0.27256
0.66	0.54203	0.28676
0.68	0.53387	0.30117
0.70	0.52593	0.31580
0.72	0.51819	0.33062
0.74	0.51064	0.34564
0.76	0.50328	0.36085
0.78	0.49610	0.37624
0.80	0.48910	0.39180
0.82	0.48227	0.40754
0.84	0.47560	0.42344

-Sigue



$x$	$x^2$ e <sup>-x<sup>2</sup></sup> erfc $x$	$x^2$ e <sup>-x<sup>2</sup></sup> erfc $x + 2x / (\pi) - 1$
0.86	0.46909	0.43950
0.88	0.46274	0.45571
0.90	0.45653	0.47207
0.92	0.45047	0.48858
0.94	0.44455	0.50523
0.96	0.43876	0.52201
0.98	0.43311	0.53892
1.00	0.42758	0.55596
1.05	0.41430	0.59910
1.10	0.40173	0.64295
1.15	0.38983	0.68746
1.20	0.37854	0.73259
1.25	0.36782	0.77833
1.30	0.35764	0.82454
1.35	0.34796	0.87127
1.40	0.33874	0.91847
1.45	0.32996	0.96611
1.50	0.32159	1.01415
1.55	0.31359	1.06258
1.60	0.30595	1.11136
1.65	0.29865	1.16048
1.70	0.29166	1.20991
1.75	0.28497	1.25964
1.80	0.27856	1.30964
1.85	0.27241	1.35991
1.90	0.26651	1.41043
1.95	0.26084	1.46118
2.00	0.25540	1.51215
2.05	0.25016	1.56334
2.10	0.24512	1.61472
2.15	0.24027	1.66628
2.20	0.23559	1.71803
2.25	0.23109	1.76994
2.30	0.22674	1.82201
2.35	0.22255	1.87424
2.40	0.21850	1.92661
2.45	0.21459	1.97912
2.50	0.21081	2.03175
2.60	0.20361	2.13740
2.70	0.19687	2.24350
2.80	0.19055	2.35001
2.90	0.18460	2.45690
3.00	0.17900	2.56414
3.10	0.17372	2.67169
3.20	0.16873	2.77954
3.30	0.16401	2.88766
3.40	0.15954	2.99602

BIBLIOTECA

FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRABIBLIOTECA FICT  
ESPOL

- Sigue

$x$	$x^2$ $e^{-x^2} \operatorname{erfc} x$	$x^2$ $e^{-x^2} \operatorname{erfc} x + \frac{2x}{\sqrt{\pi}}$
3.50	0.15529	3.10462
3.60	0.15127	3.21343
3.70	0.14743	3.32244
3.80	0.14379	3.43163
3.90	0.14031	3.54099
4.00	0.13700	3.65052
4.10	0.13383	3.76019
4.20	0.13081	3.87000
4.30	0.12791	3.97994
4.40	0.12514	4.09001
4.50	0.12248	4.20019
4.60	0.11994	4.31048
4.70	0.11749	4.42087
4.80	0.11514	4.53136
4.90	0.11288	4.64194
5.00	0.11070	4.75260
5.20	0.10659	4.97417
5.40	0.10277	5.19602
5.60	0.09921	5.41814
5.80	0.09589	5.64049
6.00	0.09278	5.86305
6.20	0.08986	6.08581
6.40	0.08712	6.30874
6.60	0.08453	6.53154
6.80	0.08210	6.75508
7.00	0.07980	6.97845
7.20	0.07762	7.20195
7.40	0.07556	7.42557
7.60	0.07361	7.64929
7.80	0.07175	7.87311
8.00	0.06999	8.09702
8.20	0.06830	8.32101
8.40	0.06670	8.54508
8.60	0.06517	8.76923
8.80	0.06371	8.99344
9.00	0.06231	9.21772
9.20	0.06097	9.44206
9.40	0.05969	9.66645
9.60	0.05846	9.89090
9.80	0.05727	10.11539
10.00	0.05614	10.33993



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

TABLA VI TABLA FUNCION ERROR COMPLEMENTARIO

### 3.3 PROGRAMA COMPUTACIONAL APLICADO

En esta sección se presentarán los 3 programas corridos en el minicomputador PC-IBM-AT en lenguaje BASIC y que son de mucha utilidad para proyectos de recuperación de petróleo utilizando inyección continua de vapor.

A continuación tendremos :

a) PROGRAMA INVASU.BAS

- Diagrama de flujo
- Listado
- Nómina de variables

b) PROGRAMA INVAPO.BAS

- Diagrama de flujo
- Listado
- Nómina de variables

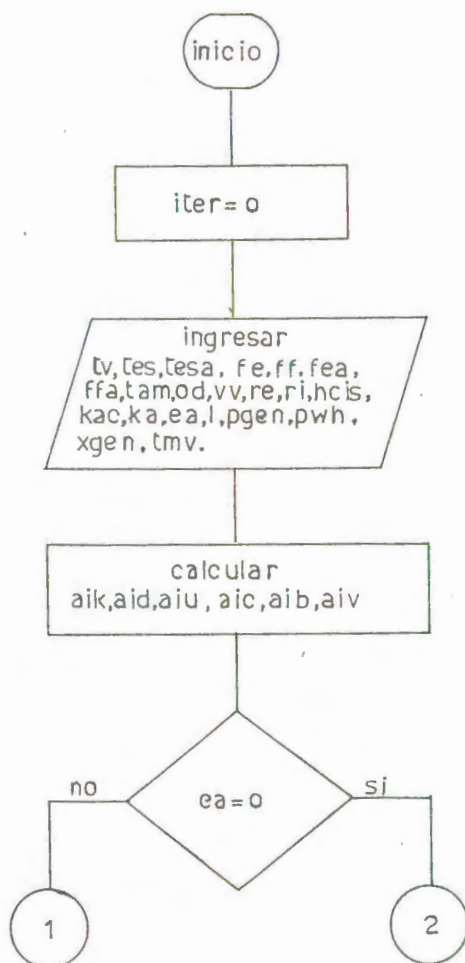
c) PROGRAMA INVAFO.BAS

- Diagrama de flujo
- Listado
- Nómina de variables

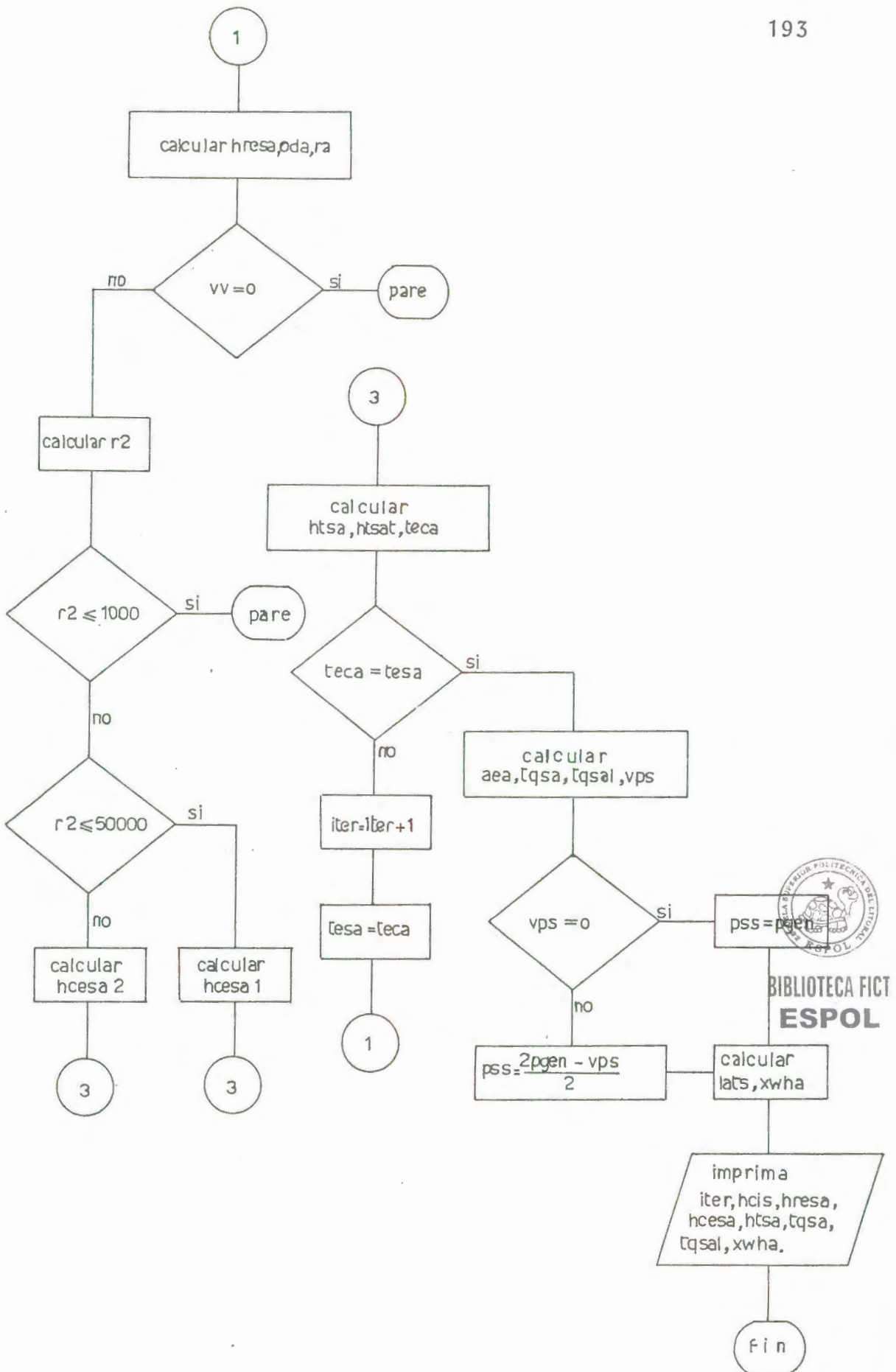


**BIBLIOTECA FICT  
ESPOL**

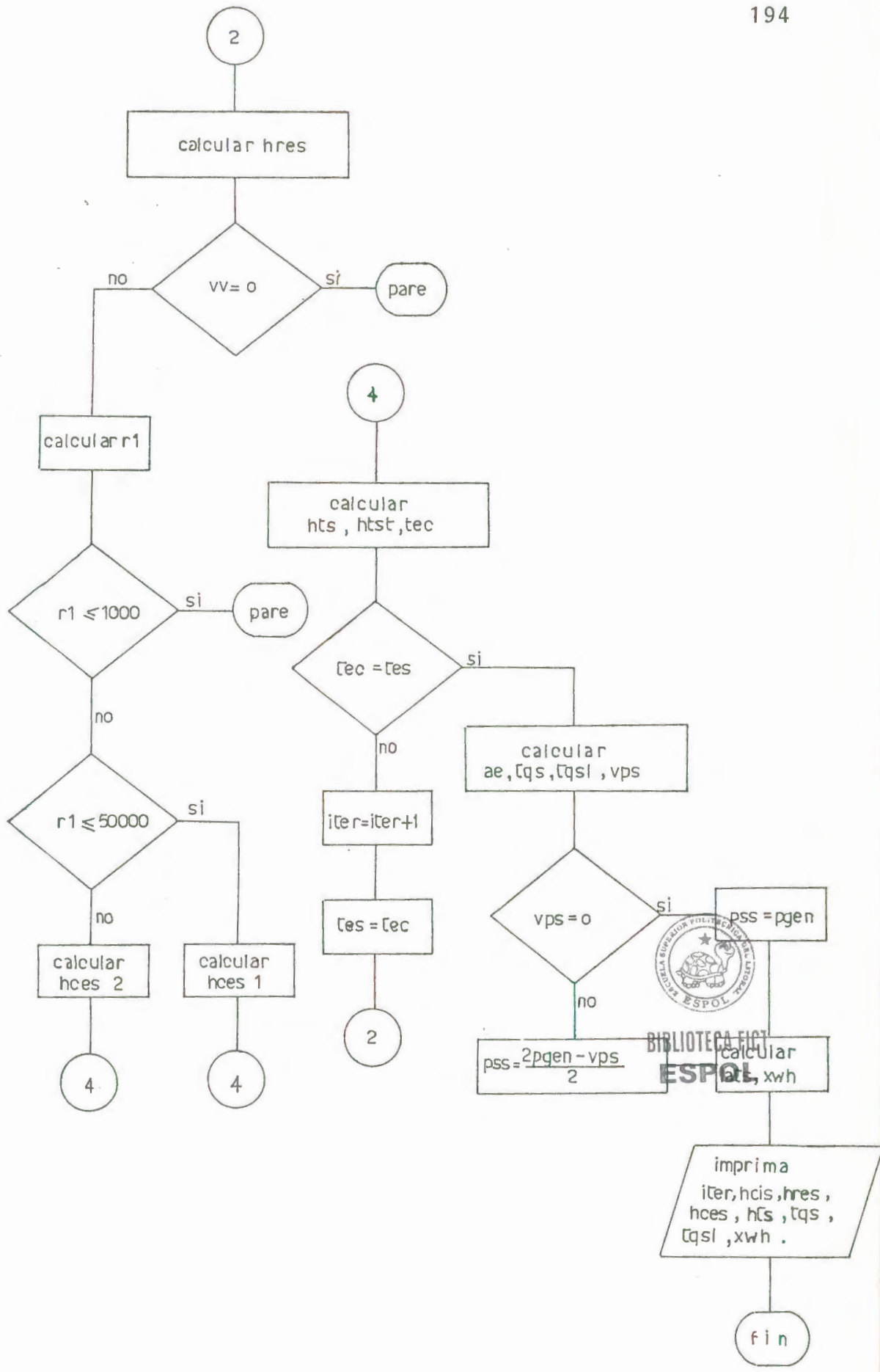
## "DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA INVASU.BAS"



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



```

0 CLS
1 '*****
2 'programa perdidas de calor en superficie(INVASU.BAS),utilizado en calculos
3 'de parametros termicos que son generados en la trayectoria: generador-cabe-
4 'za de pozo, durante la inyeccion continua de vapor.
5 '*****
10 ITER=0
20 INPUT"temperatura de saturacion del vapor a la salida del generador,TV(F)=
";TV
30 INPUT"temperatura supuesta de la superficie exterior de la tuberia super-
ficial desnuda, partiendo de la temperatura de saturacion del vapor
a la salida del generador (tes=tv),tes(f)=";TES
40 INPUT"temperatura supuesta de la superficie exterior de la tuberia super -
ficial aislada, partiendo de la temperatura de saturacion del vapor-
a la salida del generador (tesa=tv), tesa(f)=";TESA
50 INPUT"factor de emisividad de la superficie exterior de la tuberia super -
ficial desnuda, fe(adim)=";FE
60 INPUT"factor de forma de la tuberia superficial desnuda (practica comun a-
sume=1),ff(adim)=";FF
70 INPUT"factor de emisividad de la superficie exterior de la tuberia super -
ficial aislada, fea(adim)=";FEA
80 INPUT"factor de forma de la tuberia superficial aislada (practica comun a-
sume=1),ffa(adim)=";FFA
90 INPUT"temperatura ambiente , (en la practica se considera 80),tam(f)=";TAM
100 INPUT"diametro exterior de la tuberia superficial,od(pie)=";OD
110 INPUT"velocidad del viento,vv(millas/hora)=";VV
120 INPUT"radio exterior de la tuberia superficial,re(pie)=";RE
130 INPUT"radio interior de la tuberia superficial,ri(PIE)=";RI
140 INPUT"coeficiente de transferencia de calor por conveccion forzada entre -
el vapor y la superficie interna de la tuberia superficial,(para va-
por humedo tomese 300),hcis(btu/hr-pie^2-f)=";HCIS
150 INPUT"conductividad termica del material con que esta construida la tuberia
superficial,(en la practica para acero se considera buena aproxima -
cion el valor 26),kac(btu/hr-pie-f)=";KAC
160 INPUT"conductividad termica del material aislante de la tuberia superficial
(algunos de los mas usados son:magnesio variando de 0.034 a 0.04, -
corcho aprox. 0.025 y fibra aprox. 0.028),ka(btu/hr-pie-f)=";KA
170 INPUT"espesor del aislante , ea(pies)=";EA
180 INPUT"longitud de la tuberia superficial,l(pies)=";L
190 INPUT"presion de inyeccion de vapor a la salida del generador,pgen(psia)=";
PGEN
200 INPUT"presion en el cabezal del pozo,pwh(psia)=";PWH
210 INPUT"calidad del vapor a la salida del generador,xgen(fraccion)=";XGEN
215 PRINT" Si despues del siguiente input aparece BREAK in 370 o 750
significa que se a ingresado VV=0, valor que no es real
para un proyecto de ICV.
216 PRINT" De igual forma si aparece un BREAK in 390 o 770 significa
que el VV ingresado es muy pequeno y cercano a cero por lo
que se recomienda usar valores de VV>=1."
220 INPUT"tasa masica constante de inyeccion de vapor,tmv(lb/hr)=";TMV
240 REM propiedades fisicas del aire en funcion de tam(0-1000f) y pam=14.7psia
250 AIK=.01328+(2.471E-05*TAM)-(4.247E-09*TAM^2)
260 AID=.0771-(8.848E-05*TAM)+(3.744E-08*TAM^2)
270 AIU=.04+(6.155E-05*TAM)-(1.22E-08*TAM^2)
280 AIC=.2382+(.0000137*TAM)+(1.027E-08* TAM^2)
290 AIR=.0024-(9.757E-05*TAM)+(1.69E-08* TAM^2)-(1.48E-11* TAM^3)
300 AIV=AIU/AID

```



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

```

310 G=4.17E+08
320 IF EA=0 THEN GOTO 730
330 REM: tubería superficial aislada
340 HRESA=1.714E-09*FEA*FFA*(((TAM+460)^2)+(TESA+460)^2)*(TAM+460+TESA+460)
350 ODA=2*RE+2*EA
360 RA=ODA/2
370 IF VV=0 THEN STOP
380 R2=8800*ODA*VV
390 IF R2<=1000 THEN STOP
400 IF R2<=50000! THEN GOTO 450
410 HCESA=.0239*(AIK/ODA)*(5280*AID*VV*ODA/AIU)^(.805)
420 GOTO 460
450 HCESA=19.3*AIC*(AID*VV)^(.6)/ODA^(.4)
460 HTSA=(RA/(RI*HCIS)+RA*(LOG(RE/RI))/KAC+
      RA*(LOG(RA/RE))/KA+1/(HCESA+HRESA))^(.1)
470 HTSAT=(RA/(RI*HCIS)+RA*(LOG(RE/RI))/KAC+
      RA*(LOG(RA/RE))/KA)^(.1)
480 TECA=TV-HTSA*(TV-TAM)/HTSAT
490 IF TECA=TESA THEN GOTO 530
500 ITER=ITER+1
510 TESA=TECA
520 GOTO 330
530 AEA=2*3.1416*RA*L
540 TQSA=HTSA*AEA*(TV-TAM)
550 TQSAL=TQSA/L
560 VPS=PGEN-PWH
570 IF VPS=0 GOTO 600
580 PSS=(2*PGEN-VPS)/2
590 SOTO 610
600 PSS=PGEN
610 LATS=1318*PSS^(-3.773999E-02)
620 XWHA=XGEN-TQSA/(TMV*LATS)
621 PRINT"*****"
622 PRINT"tubería superficial aislada en inyección continua de vapor"
623 PRINT" parámetros térmicos de entrada "
624 PRINT"*****"
625 PRINT"tv(f)=";TV
626 PRINT"fea(adim)=";FEA
627 PRINT"ffa(adim)=";FFA
628 PRINT"tam(f)=";TAM
629 PRINT"od(pie)=";OD
630 PRINT"vv(milla/hr)=";VV
631 PRINT"re(pie)=";RE
632 PRINT"ri(pie)=";RI
633 PRINT"hcis(btu/hr-pie^2-f)=";HCIS
634 PRINT"kac(btu/hr-pie-f)=";KAC
635 PRINT"ka(btu/hr-pie-f)=";KA
636 PRINT"ea(pie)=";EA
637 PRINT"l(pie)=";L
638 PRINT"pgen(PSIA)=";PGEN
639 PRINT"pwh(PSIA)=";PWH
640 PRINT"xgen(fracción)=";XGEN
641 PRINT"tmv(lb/hr)=";TMV

```



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



```

642 PRINT"*****"
643 PRINT"tuberia superficial aislada en inyeccion continua de vapor"
644 PRINT"parametros termicos de salida"
645 PRINT"*****"
646 PRINT"iter(veces)=";ITER
650 PRINT"hcis(btu/hr-pie^2-f)=";HCIS
660 PRINT"hresa(btu/hr-pie^2-f)=";HRESA
670 PRINT"hcesa(btu/hr-pie^2-f)=";HCESA
680 PRINT"htsa(btu/hr-pie^2-f)=";HTSA
690 PRINT"tqsa(btu/hr)=";TQSA
700 PRINT"tqsal(btu/hr-pie)=";TQSAL
710 PRINT"xwha(fraccion)=";XWHA
720 END
730 REM: tuberia superficial desnuda
740 HRES=1.714E-09*FE*FF*((TAM+460)^2)+(TES+460)^2)*(TAM+460+TES+460)
750 IF VV=0 THEN STOP
760 R1=8800*OD*VV
770 IF R1<=1000 THEN STOP
780 IF R1<=50000! THEN GOTO 830
790 HCES=.0239*(AIK/OD)*(5280*AID*VV*OD/AIU)^(.805)
800 GOTO 840
830 HCES=19.3*AIC*(AID*VV)^(.6)/OD^(.4)
840 HTS=(RE/(RI*HCIS)+RE*(LOG(RE/RI))/KAC+1/(HCES+HRES))^( -1)
850 HTST=(RE/(RI*HCIS)+RE*(LOG(RE/RI))/KAC)^( -1)
860 TEC=TV-HTS*(TV-TAM)/HTST
870 IF TEC=TES THEN GOTO 910
880 ITER=ITER+1
890 TES=TEC
900 GOTO 730
910 AE=2*3.1416*RE*L
920 TQS=HTS*AE*(TV-TAM)
930 TQSL=TQS/L
940 VPS=PGEN-FWH
950 IF VPS=0 GOTO 980
960 PSS=(2*PGEN-VPS)/2
970 GOTO 990
980 PSS=PGEN
990 LATS=1318*PSS^(-8.773999E-02)
1000 XWH=XGEN-TQS/(TMV*LATS)
1001 PRINT"*****"
1002 PRINT"tuberia superficial desnuda en inyeccion continua de vapor"
1003 PRINT"parametros termicos de entrada"
1004 PRINT"*****"
1005 PRINT"tv(f)=";TV
1006 PRINT"fe(adim)=";FE
1007 PRINT"ff(adim)=";FF
1008 PRINT"tam(f)=";TAM
1009 PRINT"od(pie)=";OD
1010 PRINT"vv(millas/hr)=";VV
1011 PRINT"re(pie)=";RE
1012 PRINT"ri(pie)=";RI
1013 PRINT"hcis(btu/hr-pie^2-f)=";HCIS
1014 PRINT"kac(btu/hr-pie-f)=";KAC

```

BIBLIOTECA



FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

```
1015 PRINT"l(pie)=";L
1016 PRINT"pgen(psia)=";PGEN
1017 PRINT"pwh(psia)=";PWH
1018 PRINT"xgen(adim)=";XGEN
1019 PRINT"tmv(lb/hr)=";TMV
1020 PRINT"*****"
1021 PRINT"tuberia superficial desnuda en inyeccion continua de vapor"
1022 PRINT"parametros termicos de salida"
1023 PRINT"*****"
1024 PRINT"iter(veces)=";ITER
1030 PRINT"hcis(btu/hr-pie^2-f)=";HCIS
1040 PRINT"hres(btu/hr-pie^2-f)=";HRES
1050 PRINT"hces(btu/hr-pie^2-f)=";HCES
1060 PRINT"hts(btu/hr-pie^2-f)=";HTS
1070 PRINT"tqs(btu/hr)=";TQS
1080 PRINT"tqsl(btu/hr-pie)=";TQSL
1090 PRINT"xwh(fraccion)=";XWH
1100 END
```



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## SIMBOLOGIA UTILIZADA EN EL PROGRAMA (INVASU.BAS)

TV = Temperatura de saturación del vapor a la salida del generador, ( $^{\circ}$ F).

TES, TESA = Temperatura supuesta de la superficie exterior de la tubería superficial desnuda o aislada, partiendo de la temperatura de saturación del vapor a la salida del generador ( $^{\circ}$ F).

FE, FEA = Factor de emisividad de la superficie exterior de la tubería superficial desnuda o aislada, (adimensional).

FF, FFA = Factor de forma de la tubería superficial desnuda o aislada (adimensional).

TAM = Temperatura ambiente (F).

OD = Diámetro exterior de la tubería superficial, (pie).

VV = Velocidad del viento (millas/hora)

RE = Radio exterior de la tubería superficial (pie)

RI = Radio interior de la tubería superficial (pie)

HCIS = Coeficiente de transferencia de calor por convección forzada entre el vapor y la superficie interna de la tubería superficial (Btu/hr-pie<sup>2</sup>-F)



BIBLIOTECA FICT  
**ESPOL**

- KAC = Conductividad térmica del material con que está  
construida la tubería superficial (Btu/hr-pie-°F)
- KA = Conductividad térmica del material aislante de  
la tubería superficial (Btu/hr-pie-°F)
- EA = Espesor del aislante, (pies)
- L = Longitud de la tubería superficial, (pies)
- PGEN = Presión de inyección a la salida del generador,  
(psia).
- PWH = Presión en el cabezal del pozo, (psia).
- XGEN = Calidad del vapor a la salida del generador,  
(fracción).
- TMV = Tasa másica constante de inyección de vapor,  
(lb/hr).
- AIK = Conductividad térmica del aire, (Btu/hr-pie-°F)
- AID = Densidad del aire, (lb/pie<sup>3</sup>)
- AIU = Viscosidad dinámica del aire (lb/pie-hr = 2.42 \* cp)
- AIC = Calor específico del aire a presión constante,  
(Btu/lb-°F).
- AIB = Coeficiente de expansión volumétrica del aire,  
(pie<sup>3</sup>/pie<sup>3</sup>-°F)
- AIV = Viscosidad cinemática del aire, (pie<sup>2</sup>/hr)
- G = Constante de gravedad, (pie/hr<sup>2</sup>)
- ODA,RA = Diámetro y radio exterior del aislante, (pie)
- HRES,HRESA = Coeficiente de transferencia de calor por  
radiación de la superficie exterior de la



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

tubería superficial desnuda o aislada y el flujo existente en el medio ambiente exterior a la línea (aire generalmente), (Btu/hr-pie<sup>2</sup>- °F)

HCES,HCESA = Coeficiente de transferencia de calor por convección libre entre la superficie exterior de la tubería superficial desnuda o aislada y el fluido existente en el medio ambiente exterior a la línea (aire generalmente),(Btu/hr-pie<sup>2</sup>-°F)

HTS,HTSA = Coeficiente de transferencia de calor total a través de la tubería superficial desnuda o aislada, considerando como áreas características el área exterior de las mismas (Btu/hr-pie<sup>2</sup>-°F)

HTST,HTSAT = HTS truncado ó HTS excluyendo HCES, HRES y HTSA truncado ó HTSA excluyendo HCESA,HRESA, (Btu/hr-pie<sup>2</sup> - °F)

TEC,TECA = Temperatura calculada de la superficie exterior de la tubería superficial desnuda o aislada, (°F).

ITER = Número de iteraciones para lograr los resultados (adimensional).

TQS,TQSA = Tasa de pérdidas de calor a través de las paredes de la tubería superficial desnuda o aislada, (Btu/hr).



TQSL, TQSAL = TQS y TQSA por unidad de longitud, (Btu/hr-pie).

VPS = Caída de presión en la tubería superficial, (lb/pul<sup>2</sup>).

PSS = Presión de vapor o de saturación constante en la tubería superficial, (psia).

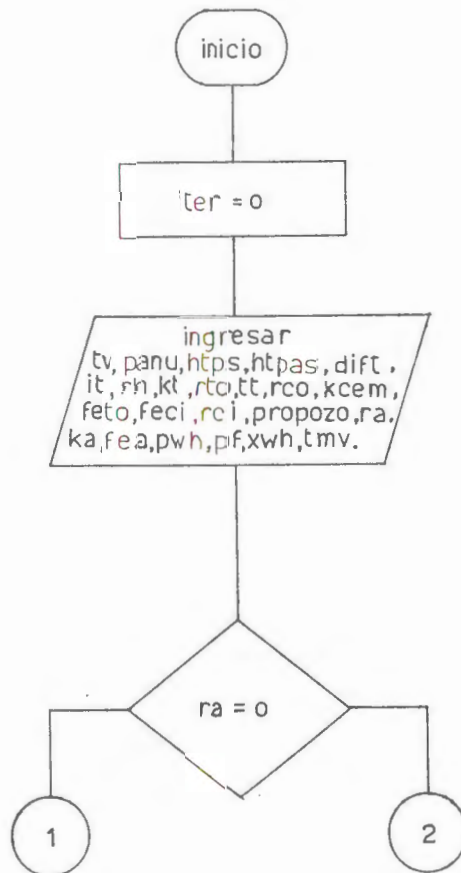
LATS = Calor latente del vapor en la tubería superficial, (Btu/lb).

XWH, XWHA = Calidad del vapor en el cabezal del pozo considerando tubería superficial desnuda o aislada, (fracción adimensional).



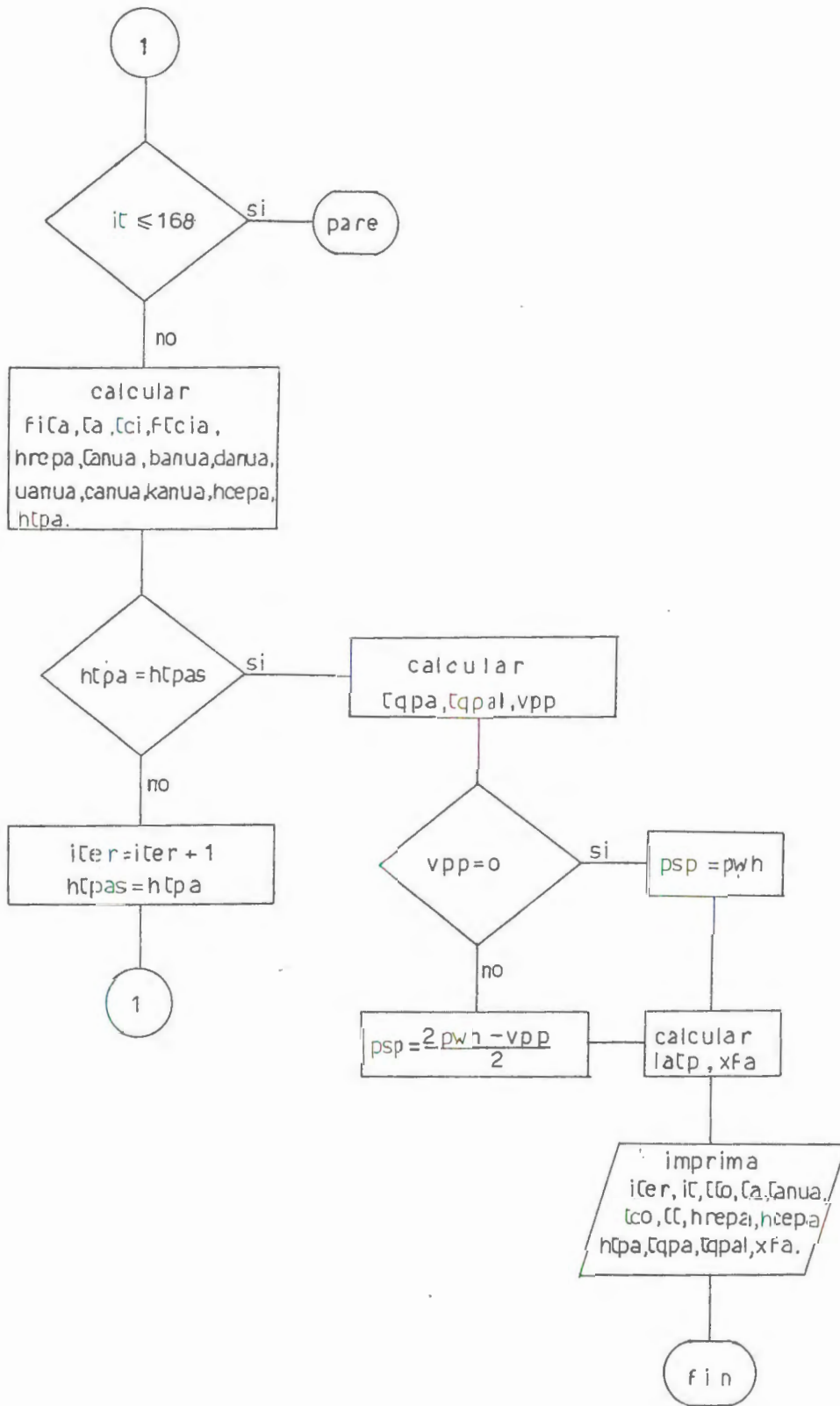
BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

"DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA INVAPO.BAS"

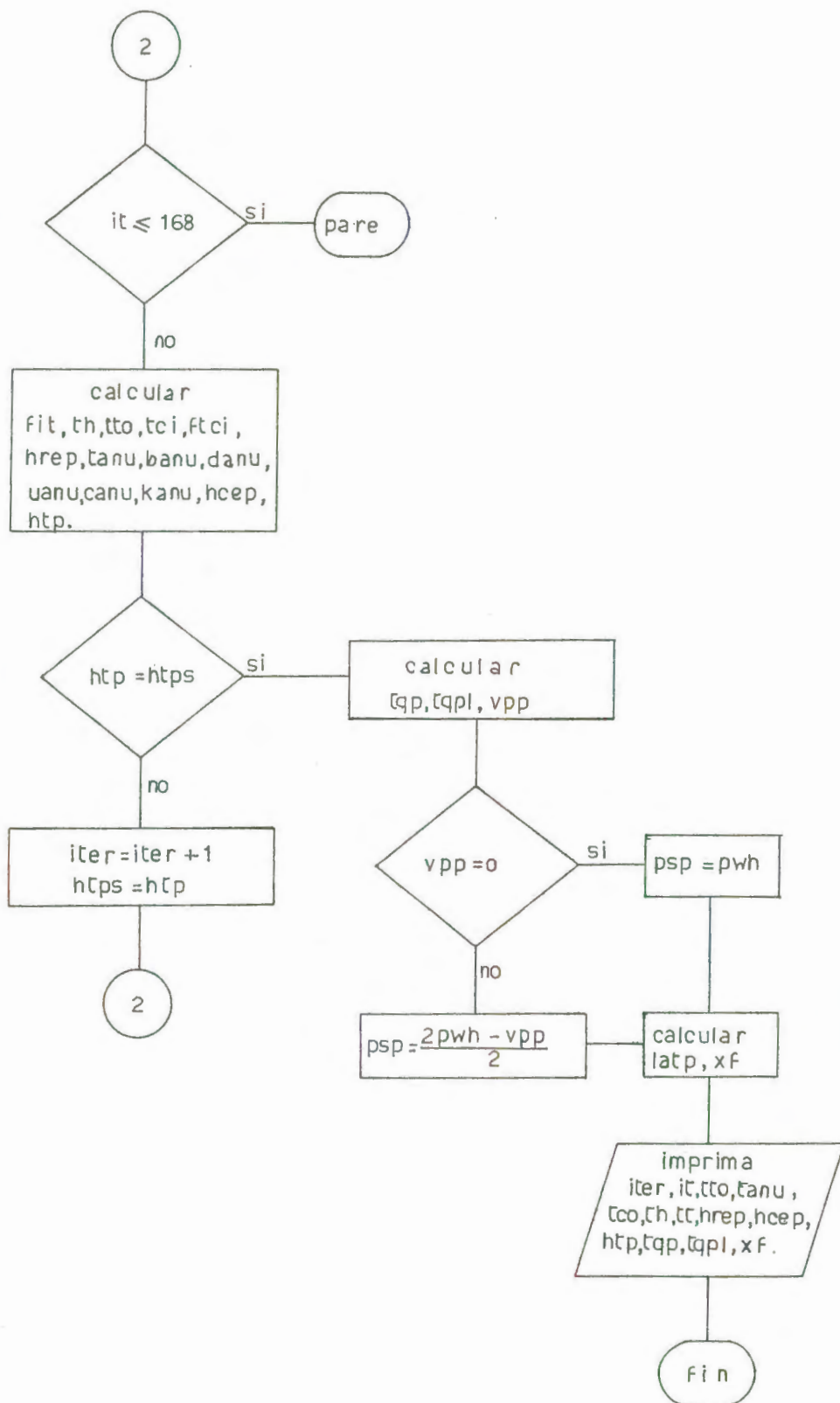


BIBLIOTECA FICT  
ESPOL









BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

```

1 '*****
2 ' Programa perdidas de calor en el pozo(INVAPO.BAS),utilizado para calculo de
3 ' parametros termicos que son generados en la trayectoria Cabeza del pozo-cara
4 ' de la formacion de interes durante la inyeccion continua de vapor .
5 '*****

```

```
20 ITER= 0
```

```

30 INPUT "Temperatura del vapor fluyendo en la tuberia de produccion
(usado para inyectar vapor),TV(F)=";TV
40 PRINT "Establecer el tipo de aislante a usarse en
la tuberia de produccion= ;AIS"
41 INPUT "Presion anular (tub. de produccion-tub. de revestimiento),
PANU(psi)=";PANU
50 PRINT"Con los valores TV,AIS y PANU ingreso a fig # 3,SPE 10,Pg 73
(Disenada para diametro de tuberia de produccion de 2 7/8 pulg.y
tuberia de revestimiento de 7 pulg.), y se obtiene HTPS o HTPAS."
51 PRINT"* Para establecer HTPS se recomienda usar como referencia
la curva MILL SCALE de presion anular=0 psi."
52 PRINT"* Para establecer HTPAS se recomienda usar como referencia
la curva de COMMERCIAL INSULATION de 1 pulgada."
60 INPUT "Coeficiente de transferencia de calor total supuesto desde el inte-
rior de la tuberia de produccion desnuda hasta la interface cemento
-formacion, HTPS(BTU/Hr-pie^2-F) = ";HTPS
70 INPUT "Coeficiente de transferencia de calor total supuesto desde el inte-
rior de la tub.de prod.aislada hasta la interface superficie.ext.de
la tub.de rev.-formacion ,HTPAS(BTU/Hr-pie^2-F) = ";HTPAS
80 INPUT "Difusividad termica de la formacion,DIFT(pie^2/Hr)= ";DIFT
90 INPUT "Tiempo de inyeccion del vapor, IT (Hrs) = "; IT
100 INPUT "Radio del hueco perforado,RH(pies) = ";RH
110 INPUT "Conductividad termica de la formacion,KT(BTU/Hr-pie-F)= ";KT
120 INPUT "Radio externo de la tuberia de produccion, RTO(pies) = ";RTO
140 INPUT "Temperatura inicial de la formacion, TT(^F) = ";TT
150 INPUT "Radio externo de la tuberia de revestimiento, RCO(pies) = ";RCO
160 INPUT "Conductividad termica del cemento (utilizado en la cementacion
de la tuberia de revestimiento) a temperatura y presion promedio,
KCEM (BTU/Hr-pie-F) = ";KCEM
170 INPUT "Factor de emisividad de la superficie exterior de la tuberia de
produccion ,FETO (adimensional) = ";FETO
180 INPUT "Factor de emisividad de la superficie interior de la tuberia de
revestimiento,FECI(adimensional) = ";FECI
190 INPUT "Radio interno de la tuberia de revestimiento , RCI(pies) = ";RCI
200 INPUT "Profundidad del pozo, PROPOZO (pies) = ";PROPOZO
210 INPUT "Radio del aislante, RA(pies) = ";RA
220 INPUT "Conductividad termica del aislante, KA(BTU/Hr-pie-F) = ";KA
240 INPUT "Factor de emisividad de la superficie exterior del aislante,
FEA (adimensional) = ";FEA
250 INPUT "Presion en el cabezal del pozo, PWH (psia) = ";PWH
260 INPUT "Presion en la cara de la arena, PF (psia) = ";PF
270 INPUT "Calidad del vapor en el cabezal del pozo,
XWH (fraccion adimensional) = ";XWH
271 PRINT"* Si despues del siguiente INPUT aparece BREAK IN 540 o
1200 significa que debo considerar un IT mayor a 7 dias."
272 PRINT"* De igual forma si aparece un BREAK IN 611 significa que
debo tomar un HTPAS menor al considerado."
280 INPUT "Tasa masica constante de inyeccion de vapor, TMV (Lbs/Hr) = ";TMV
500 IF RA=0 THEN GOTO 1190

```

BIBLIOTECA



FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA

```

530      'POZO CON TUBERIA DE PRODUCCION AISLADA
540 IF IT<=168 THEN STOP
550      ' FITA es valido solo para IT > 7 dias o 168 Hrs.
560 FITA =(LOG(2*(DIFT*IT)^(.5)/RCO))-(.29)
580 T1TA = RTO*HTPAS*(LOG(RA/RTO))/KA
590 T2TA = (TT*KT/FITA)+ HTPAS*RTO*TV
600 T3TA = HTPAS*RTD +(KT/FITA)
610 T4TA=T1TA*(TV-(T2TA/T3TA))
611 IF TV<=T4TA THEN STOP
612 TA=TV-T4TA
620 ' Ya que en la ecuacion completa de transferencia de calor total en el pozo
    con tuberia de produccion aislada, Willhite considera despreciable el
    efecto de los terminos conteniendo HCIP y KAC, entonces se asumira que:
630 '      a) TTI= TTO= TV
640 '      b) TCO =TCI
650 TTO = TV
660 TCO = TT+((KA*FITA*(TTO-TA))/(KT*LOG(RA/RTO)))
670 TCI = TCO
680 FTCIA=((1/FEA)+(RA/RCI)*((1/FECI)-1))^-1)
690 HREPA=1.714E-09*FTCIA*((TA+460)^2)+(TCI+460)^2)*(TA+460+TCI+460)
700 'Para calcular HCEPA previamente debo determinar las propiedades del fluido
    en el espacio anular(tub.de prod.aislada-tub.de rev.),para el caso comun de
    aire a presion atm,(14.7 psia)y temperatura del anular TANUA(F),se tendra:
710 TANUA = (TA + TCI)/2
720 BANUA = 1/TANUA
730 DANUA = .0771-(8.848E-05*TANUA)+(3.744E-08*TANUA^2)
740 UANUA =.04+ (6.155E-05*TANUA)-(1.22E-08*TANUA^2)
750 CANUA =.2382+(.0000139*TANUA)+(1.027E-08*TANUA^2)
760 KANUA =.01328+(2.471E-05*TANUA)-(4.247E-09*TANUA^2)
770 G = 4.17E+08
780 GRA =((RCI-RA)^3)*G*(DANUA^2)*BANUA*(TA - TCI)/UANUA^2
790 PRA = (CANUA*UANUA)/KANUA
800 HCEPA = .049*KANUA*((GRA*PRA)^.333)*(PRA^.074)/(RA*LOG(RCI/RA))
810 HTPA =((RTO*(LOG(RA/RTO))/KA)+(RTO/(RA*(HCEPA + HREPA))))^-1)
820 IF HTPA=HTPAS THEN GOTO 860
830 ITER=ITER + 1
840 HTPAS = HTPA
850 GOTO 530
860 TQPA = 2*3.1416*RTO*HTPA*(TV - TCO)*PROPOZO
960 TQPAL = TQPA/PROPOZO
970 VPP = PWH - PF
980 IF VPP = 0 GOTO 1010
990 PSP = (2*PWH - VPP)/2
1000 GOTO 1020
1010 PSP = PWH
1020 LATP = 1318*PSP^(-8.773999E-02)
1025 XFA = XWH - TQPAL/(TMV*LATP)
1030 PRINT"*****"
1031 PRINT"POZO CON TUBERIA DE PRODUCCION AISLADA EN ICV"
1032 PRINT"PARAMETROS TERMICOS DE ENTRADA"
1033 PRINT"*****"
1034 PRINT "TV(F)=";TV
1035 PRINT "AIS=";AIS
1036 PRINT "PANU(psi)=";PANU
1037 PRINT"HTPAS(BTU/HR-PIE^2-F)=";HTPAS
1038 PRINT"DIFT(PIE^2/HR)=";DIFT
1039 PRINT"IT(HORAS)=";IT

```



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

```

1040 PRINT"RH(PIES)=";RH
1041 PRINT"KT(BTU/HR-PIE-F)=";KT
1042 PRINT"RTO(PIE)=";RTO
1044 PRINT"TT(F)=";TT
1045 PRINT"RCD(PIE)=";RCD
1046 PRINT"KCEM(BTU/HR-PIE-F)=";KCEM
1047 PRINT"FETO(ADIM)=";FETO
1048 PRINT"FECI(ADIM)=";FECI
1049 PRINT"RCI(PIE)=";RCI
1050 PRINT"PROPOZO(PIE)=";PROPOZO
1051 PRINT"RA(PIE)=";RA
1052 PRINT"KA(BTU/HR-PIE-F)=";KA
1053 PRINT"FEA(ADIM)=";FEA
1054 PRINT"PMH(PSIA)=";PMH
1055 PRINT"PF(PSIA)=";PF
1056 PRINT"XWH(FRACCION)=";XWH
1057 PRINT"TMV(LB/HR)=";TMV
1058 PRINT"*****"
1059 PRINT"POZO CON TUBERIA DE PRODUCCION AISLADA EN ICV"
1060 PRINT"PARAMETROS TERMICOS DE SALIDA "
1061 PRINT"*****"
1062 PRINT"ITER(VECES)=";ITER
1063 PRINT"IT(HORAS)=";IT
1070     PRINT "TTI=TTO=TV (^F)= ";TTO
1080     PRINT "TA (^F)= ";TA
1090     PRINT "TANUA (^F)= ";TANUA
1100     PRINT "TCO=TCI (^F)= ";TCO
1110     PRINT "TT (^F)= ";TT
1120     PRINT "HREPA (BTU/Hr-pie^2-F)= ";HREPA
1130     PRINT "HCEPA (BTU/Hr-pie^2-F)= ";HCEPA
1140     PRINT "HTPA (BTU/Hr-pie^2-F)= ";HTPA
1150     PRINT "TQPA (BTU/Hr)= ";TQPA
1160     PRINT "TQPAL (BTU/Hr-pie)= ";TQPAL
1170     PRINT " XFA (fraccion adimen)= ";XFA
1180 END
1190     ' POZO CON TUBERIA DE PRODUCCION DESNUDA
1200 IF IT <= 168 THEN STOP
1210     FIT =(LOG(2*(DIFT*IT)^(.5)/RH))-(.29)
1220     DTH = FIT + KT/(RTO*HTPS)
1230     TH = (TV*FIT + (KT/(RTO*HTPS))*TT)/DTH
1240     ' ya que en la ecuacion completa de transferencia de calor total en el
1250     ' pozo con tuberia de produccion desnuda, Willhite considera despreciable
1260     ' el efecto de los terminos conteniendo HCIP y KAC , entonces se asumira
1270     ' que :
1280     ' a) TTI= TTO= TV
1290     ' b) TCO= TCI
1300     TTO = TV
1310     TCO = TH + (RTO*HTPS*(LOG(RH/RCD)))*(TV - TH)/KCEM
1320     TCI = TCO
1330     FTCI = (((1/FETO)+(RTO/RCI)*((1/FECI)-1))^-1)
1340     HREP=1.714E-09*FTCI*(((TTO+460)^2)+(TCI+460)^2)*(TTO+460+TCI+460)
1350     'Para calcular HCEP previamente debo determinar las propiedades del fluido
1360     ' en el espacio anular (tub.de prod.desnuda-tub.de rev.),para el caso aire a
1370     ' presion atmosferica(14.7psia) y temperatura del anular TANU(^F),tendremos:
1380     TANU=(TV+TCI)/2

```



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



```

1331 BANU=1/TANU
1332 DANU=.0771-(8.848E-05*TANU)+(3.744E-08*TANU^2)
1333 UANU=.04+(6.155E-05*TANU)-(1.22E-08*TANU^2)
1350 CANU = .2382 +(1.0000139*TANU)+(1.027E-08*TANU^2)
1360 KANU = .01328+(2.471E-05*TANU)-(4.247E-09*TANU^2)
1370 G = 4.17E+08
1380 GR = ((RCI - RTO)^3)*G*(DANU^2)*BANU*(TTO - TCI)/UANU^2
1390 PR = (CANU*UANU)/KANU
1400 HCEP = .049*KANU*((GR*PR)^.333)*(PR^.074)/((RTO*LOG(RCI/RTO))
1410 HTP = ((1/(HCEP + HREP)))+(RTO*(LOG(RH/RCO))/KCEM))^(-1)
1420 IF HTP = HTPS THEN GOTO 1460
1430 ITER = ITER + 1
1440 HTPS = HTP
1450 GOTO 1190
1460 TQP = 2*3.1416*RTO*HTP*(TV - TH)*PROPOZO
1530 TQPL = TQP/PROPOZO
1540 VPP = PWH - PF
1550 IF VPP = 0 GOTO 1580
1560 PSP = (2*PWH - VPP)/2
1570 GOTO 1590
1580 PSP = PWH
1590 LATP = 1318*PSP^(-8.773999E-02)
1591 XF = XWH - TQPL/(TMV*LATP)
1592 PRINT"*****"
1593 PRINT"POZO CON TUBERIA DE PRODUCCION DESNUDA EN ICV"
1594 PRINT"PARAMETROS TERMICOS DE ENTRADA"
1595 PRINT"*****"
1596 PRINT "TV(F)=";TV
1597 PRINT "AIS=";AIS
1598 PRINT "PANU(PSI)=";PANU
1599 PRINT"HTPS(BTU/HR-PIE^2-F)=";HTPS
1600 PRINT"DIFT(PIE^2/HR)=";DIFT
1609 PRINT"IT(HORAS)=";IT
1610 PRINT"RH(PIES)=";RH
1611 PRINT"KT(BTU/HR-PIE-F)=";KT
1612 PRINT"RTO(PIE)=";RTO
1614 PRINT"TT(F)=";TT
1615 PRINT"RCO(PIE)=";RCO
1616 PRINT"KCEM(BTU/HR-PIE-F)=";KCEM
1617 PRINT"FETO(ADIM)=";FETO
1618 PRINT"FECI(ADIM)=";FECI
1619 PRINT"RCI(PIE)=";RCI
1620 PRINT"PROPOZO(PIE)=";PROPOZO
1621 PRINT"PWH(PSIA)=";PWH
1622 PRINT"PF(PSIA)=";PF
1623 PRINT"XWH(FRACCION)=";XWH
1624 PRINT"TMV(LB/HR)="TMV
1625 PRINT"*****"
1626 PRINT"POZO CON TUBERIA DE PRODUCCION DESNUDA EN ICV"
1627 PRINT"PARAMETROS TERMICOS DE SALIDA"
1628 PRINT"*****"
1629 PRINT"ITER(veces)=";ITER
1630 PRINT " IT (horas) =";IT
1640 PRINT " TTI= TTO= TV (^F) =";TTO

```

BIBLIOTECA

FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRABIBLIOTECA FIC1  
ESPOL

```
1650 PRINT " TANU (^F)          =" ;TANU
1660 PRINT " TCO= TCI (^F)     =" ;TCO
1670 PRINT " TH (^F)           =" ;TH
1680 PRINT " TT (^F)            =" ;TT
1690 PRINT " HREP (BTU/Hr-pie^2-F) =" ;HREP
1700 PRINT " HCEP (BTU/Hr-pie^2-F) =" ;HCEP
1710 PRINT " HTP (BTU/Hr-pie^2-F)  =" ;HTP
1720 PRINT " TQP (BTU/Hr)          =" ;TQP
1730 PRINT " TQPL (BTU/Hr-pie)     =" ;TQPL
1740 PRINT " XF (fraccion adimen)  =" ;XF
1750 END
```



**BIBLIOTECA FICT  
ESPOL**

## SIMBOLOGIA UTILIZADA EN EL PROGRAMA (INVAPO.BAS)

TV = Temperatura del vapor de inyección, ( $^{\circ}\text{F}$ )

PANU = Presión anular, (psi)

HTPS, HTPAS = Coeficiente de transferencia de calor total supuesto en tubería de producción desnuda y aislada, ( $\text{Btu/hr-pie}^2\text{-}^{\circ}\text{F}$ ).

DIFT = Difusividad térmica de la formación circundante al pozo, ( $\text{pie}^2/\text{hr}$ ).

IT = Tiempo de inyección del vapor, (horas)

RH = Radio del hoyo, (pies).

KT = Conductividad térmica de la formación circundante al pozo, ( $\text{Btu/hr-pie-}^{\circ}\text{F}$ ).

RTO = Radio externo de la tubería de producción, (pies)

TT = Temperatura inicial de la formación, ( $^{\circ}\text{F}$ )

RCO = Radio externo de la tubería de revestimiento, (pies)

KCEM = Conductividad térmica del cemento utilizado en la cementación de la tubería de revestimiento, ( $\text{Btu/hr-pie-}^{\circ}\text{F}$ ).

FETO = Factor de emisividad de la superficie exterior de la tubería de producción, (adimensional).



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

- FECI = Factor de emisividad de la superficie interior de la tubería de revestimiento, (adimensional).
- RCI = Radio interno de la tubería de revestimiento, (pies)
- PROPOZO = Profundidad del pozo, (pies)
- RA = Radio del aislante, (pies)
- KA = Conductividad térmica del aislante, (Btu/hr-pie-°F)
- FEA = Factor de emisividad de la superficie exterior del aislante, (adimensional).
- PWH = Presión en el cabezal del pozo, (psia)
- PF = Presión en la cara de la arena, (psia)
- XWH = Calidad del vapor en el cabezal del pozo, (fracción adimensional).
- TMV = Tasa másica constante de inyección de vapor, (lb/hr)
- FIT = Función del tiempo, de la ecuación para calcular la transferencia de calor entre la interface cemento-formación y la formación circundante al pozo, considerando tubería de producción sin aislante.
- FITA = Función del tiempo, de la ecuación para calcular la transferencia de calor desde el exterior de la tubería de revestimiento hacia la formación circundante al pozo, considerando tubería de producción con aislante.
- TH = Temperatura de la interface cemento-formación, (°F)
- TA = Temperatura del aislante, (°F).



BIBLIOTECA FICT  
**ESPOL**



TTO,TTI = Temperatura de la superficie exterior e interior de la tubería de producción, ( $^{\circ}\text{F}$ ).

HREP,HREPA = Coeficiente de transferencia de calor por radiación, entre la superficie exterior de la tubería de producción sin y con aislante, y la interna de la tubería de revestimiento, ( $\text{Btu/hr-pie}^2 - ^{\circ}\text{F}$ )

HCIP = Coeficiente de transferencia de calor por convección forzada entre el vapor y la pared interna de la tubería de producción (para vapor húmedo varía entre 500 y 4.000), ( $\text{Btu/hr-pie}^2 - ^{\circ}\text{F}$ ).

TANU, TANUA = Temperatura del anular sin y con aislante ( $^{\circ}\text{F}$ ).

BANU-BANUA, DANU-DANUA, UANU-UANUA, CANU-CANUA, KANU-KANUA = Coeficiente de expansión volumétrica, densidad, viscosidad dinámica, calor específico a presión constante, conductividad térmica del fluido en el espacio anular considerando tubería de producción sin y con aislante, ( $\text{vol/vol-}^{\circ}\text{F}$ ,  $\text{lb/pie}^3$ ,  $\text{lb/pie-hr}$ ,  $\text{Btu/lb-}^{\circ}\text{F}$ ,  $\text{Btu/hr-pie-}^{\circ}\text{F}$ ).

G = Constante de gravedad, ( $\text{pie/hr}^2$ )

HCEP,HCEPA = Coeficiente de transferencia de calor por convección libre en el espacio anular, considerando tubería de producción desnuda o aislada, ( $\text{Btu/hr-pie}^2 - ^{\circ}\text{F}$ )

HTP,HTPA = Coeficiente de transferencia de calor total considerando tubería de producción desnuda o aislada, ( $\text{Btu/hr-pie}^2 - ^{\circ}\text{F}$ )



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

TQP, TQPA = Tasa de pérdidas de calor en el pozo con tubería de producción desnuda o aislada, (Btu/hr).

TQPL, TQPAL = TQP y TQPA por unidad de longitud (profundidad), (Btu/hr-pie).

VPP = Caída de presión en la tubería de producción, (psi).

PSP = Presión del vapor o de saturación constante en la tubería de producción, (psia).

LATP = Calor latente del vapor en la tubería de producción, (Btu/lbs).

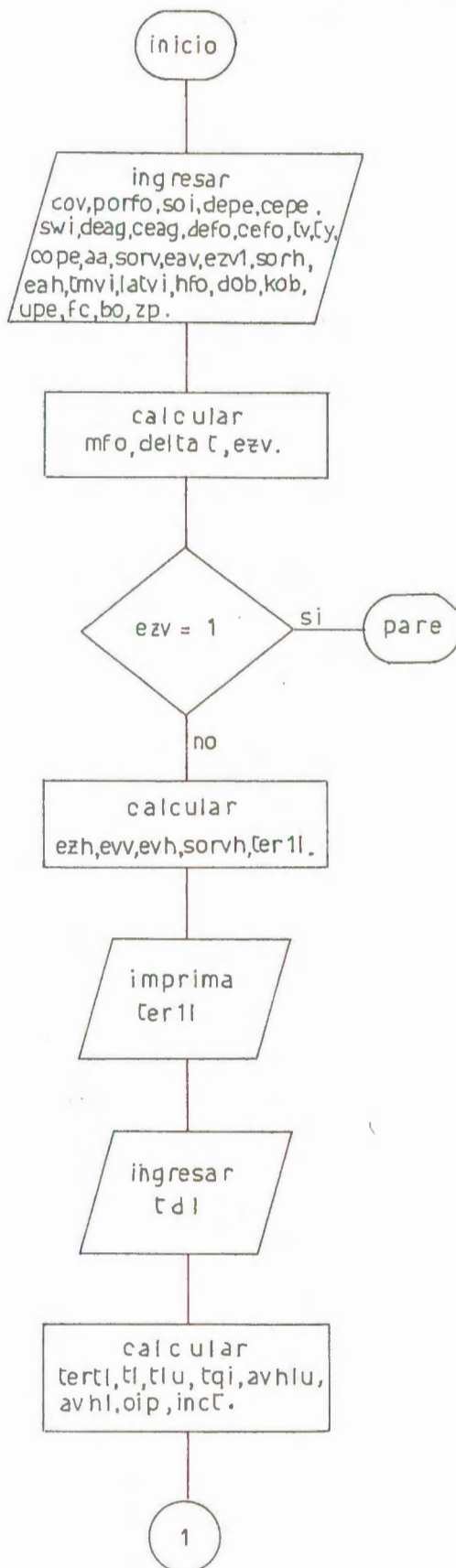
XF, XFA = Calidad del vapor en la cara de la arena considerando tubería de producción desnuda o aislada, (fracción adimensional).

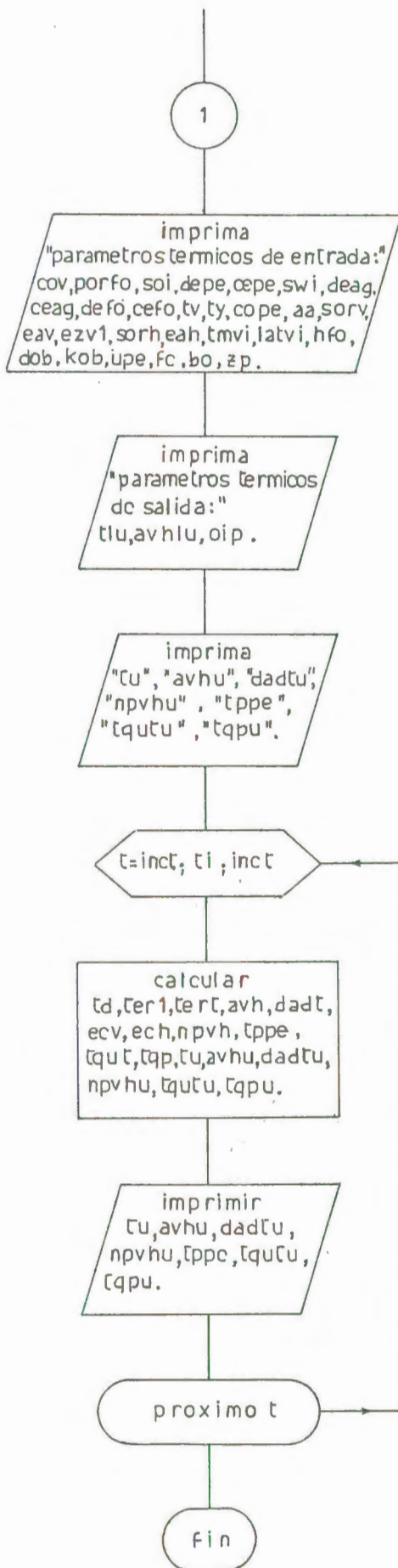
TCO, TCI = Temperatura de la superficie exterior e interior de la tubería de revestimiento.



**BIBLIOTECA FICT  
ESPOL**

## "DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA INVAFO.BAS"





**BIBLIOTECA FICT  
ESPOL**

```

1 ' *****
2 ' Programa perdidas de calor en la formacion y recuperacion de petroleo
3 ' versus tiempo (INVAFO.BAS),utilizado para calculo de parametros termicos
4 ' generados en la formacion durante la inyeccion continua de vapor.
5 ' *****
20 INPUT"costo de generacion de vapor,COV (dolares/MMBTU)=";COV
30 INPUT"porosidad de la formacion, PORFO (fraccion)=";PORFO
40 INPUT"saturacion de petroleo inicial,SOI (fraccion)=";SOI
50 INPUT"densidad del petroleo,DEPE (lbs/pie^3)=";DEPE
60 INPUT"calor especifico del petroleo,CEPE (Btu/lb-F)=";CEPE
70 INPUT"saturacion de agua inicial,SWI(fraccion)=";SWI
80 INPUT"densidad del agua,DEAG(lbs/pie^3)=";DEAG
90 INPUT"calor especifico del agua,CEAG(Btu/lb-F)=";CEAG
100 INPUT"densidad de la formacion, DEFO (lbs/pie^3)=";DEFO
110 INPUT"calor especifico de la formacion,CEFO(Btu/lb-F)=";CEFO
120 INPUT"temperatura del vapor de inyeccion,TV(F)=";TV
130 INPUT"temperatura inicial de la formacion,TY(F)=";TY
140 INPUT"costo neto del petroleo desplazado,COPE(Dolares/B)=";COPE
141 INPUT"area del arreglo sometida a inyeccion,AA (acres)=";AA
142 PRINT"....."

150 PRINT"LOS VALORES SORV, EAV, EZV1, SORH, EAH, EZH1,SON OBTENIDOS DE LA
SIGUIENTE TABLA:
SEGUN NPC(VISCOSIDAD ELEVADA)>=100CP Y SG<=15 API"
160 PRINT"      2.5 ACRES          5ACRES          >=10ACRES
      ** (fracciones)      ** (pie/zona)      ** (fracciones)
      ** EAV=.70-.65-.60  ** EZV1=20-15-10  ** SORV=.15-.15-.15
161 PRINT" ** EAH=.9-.85-.8  ** EZH1=40-35-30  ** SORH=.25-.25-.25
....."

170 INPUT"saturacion del petroleo residual en la zona barrida
por el vapor ,SORV(fraccion)=";SORV
180 INPUT"eficiencia areal de la formacion barrida por el vapor,
EAV(fracciones) =" ;EAV
190 INPUT"eficiencia vertical de la formacion barrida por el vapor
expresado en pie/zona,EZV1(pie/zona)=";EZV1
200 INPUT"saturacion del petroleo residual en la zona barrida
por el agua caliente,SORH (fraccion)=";SORH
210 INPUT"eficiencia areal de la formacion barrida por el agua caliente,
EAH(fraccion)=";EAH
230 INPUT"tasa masica constante de vapor que continuamente es
inyectado al pozo,TMVI(lbs/hr)=";TMVI
240 INPUT"calor por unidad de masa de vapor a la temperatura de
saturacion disponible en el generador,LATVI(Btu/lb)=";LATVI
250 INPUT"espesor promedio de la formacion de interes,HFO(pies)=";HFO
260 INPUT"difusividad termica de las formaciones adyacentes,DOB(pie^2/hr)=";DOB
270 INPUT"conductividad termica de las formaciones adyacentes,
KOB(btu/hr-pie-F)= ";KOB
275 INPUT"viscosidad del petroleo,UPE (cp)=";UPE
280 PRINT"El factor de captura segun el NPC esta dado por la siguiente tabla:
      VISCOSIDAD (CP)          FACTOR DE CAPTURA (ADIM)
      UPE<20                    1
281 PRINT"      20<UPE<100                2
      100<UPE<1000                4
      UPE>1000                    6
290 INPUT"factor de captura, FC(adimensional)=";FC

```



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



```

300 INPUT"factor volumetrico del petroleo, BO (B/stb)=";BO
301 PRINT"* Si despues del siguiente INPUT aparece BREAK IN 322 se
      recomienda de ser posible incrementar el HFO porque para inyeccion
      continua de vapor resulta muy pequeno."
302 INPUT"numero de zonas productivas en el espesor
      promedio de formacion,ZP(zonas)=";ZP
310 MFO=(1-PORFO)*DEFO*CEFO+SWI*PORFO*DEAG*CEAG+SOI*PORFO*DEPE*CEPE
320 DELTAT=TV-TY
321 EZV=(EZV1*ZP)/HFO
322 IF EZV >=1 THEN STOP
323 EZH=1-EZV
324 EVV=EAV*EZV
325 EVH=EAH*EZH
326 SORVH=(EVV*SORV)+(EVH*SORH)+((1-EVV-EVH)*SOI)
330 TER1L= 5.618E-06*(COV*MFO*DELTAT)/(COPE*PORFO*(SOI-SORVH))
340 PRINT"TER1L=EXP^(TDL^2)*ERFC(TDL),(ADIMENSIONAL)=";TER1L
350 PRINT"Con el valor TER1L ingresar a la tabla VI (Tabla funcion error
      complementario), obtener TDL e ingresarlo en la siguiente
      sentencia "
360 INPUT"TIEMPO ADIMENSIONAL AL LIMITE ECONOMICO,TDL (ADIMENSIONAL)=";TDL
370 TERTL=TER1L+(2*TDL/3.1416^.5)-1
380 TL=(TDL^2)*(MFO^2)*(HFO^2)*DOB/(4*KOB^2)
390 TLU=TL/24
400 TQI=TMVI*LATVI
410 AVHL=TQI*MFO*HFO*DOB*TERTL/(4*(KOB^2)*(TV-TY))
420 AVHLU=AVHL/1000
430 DIP=43560!*AA*HFO*PORFO*SOI/5.615
431 INCT=TL/10
440 PRINT"*****"
450 PRINT"FORMACION SOMETIDA A INYECCION CONTINUA DE VAPOR"
460 PRINT"PARAMETROS TERMICOS DE ENTRADA"
470 PRINT"*****"
480 PRINT"COV(DOLARES/MMBTU)=";COV
490 PRINT"PORFO(FRACCION)=";PORFO
500 PRINT"SOI(FRACCION)=";SOI
510 PRINT"DEPE(LB/PIE^3)=";DEPE
520 PRINT"CEPE(BTU/LB-F)=";CEPE
530 PRINT"SWI(FRACCION)=";SWI
540 PRINT"DEAG(LB/PIE^3)=";DEAG
550 PRINT"CEAG(BTU/LB-F)=";CEAG
560 PRINT"DEFO(LB/PIE^3)=";DEFO
570 PRINT"CEFO(BTU/LB-F)=";CEFO
580 PRINT"TV(F)=";TV
590 PRINT"TY(F)=";TY
600 PRINT"COPE(DOLARES/B)=";COPE
610 PRINT"AA(ACRES)=";AA
620 PRINT"SORV(FRACCION)=";SORV
630 PRINT"EAV(FRACCION)=";EAV
640 PRINT"EZV1(PIE/ZONA)=";EZV1
650 PRINT"SORH(FRACCION)=";SORH
660 PRINT"EAH(FRACCION)=";EAH
680 PRINT"TMVI(LB/HR)=";TMVI
690 PRINT"LATVI(BTU/LB)=";LATVI
700 PRINT"HFO(PIES)=";HFO
710 PRINT"DOB(PIE^2/HR)=";DOB
720 PRINT"KOB(BTU/HR-PIE-F)=";KOB
730 PRINT"UPE(CP)=";UPE

```

BIBLIOTECA



FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

```

740 PRINT"FC(ADIMENSIONAL)=";FC
750 FRINT"BO(B/STR)=";BO
760 PRINT"ZP(ZONAS)=";ZP
770 PRINT "EN LOS PARAMETROS TERMICOS DE SALIDA NOTESE QUE:"
780 PRINT "TIEMPO DE INYECCION CONTINUA DE VAPOR AL LIMITE
      ECONOMICO, TLU(DIAS)=";TLU
781 PRINT "AREA DE FORMACION CALENTADA POR VAPOR Y AGUA CALIENTE
      HASTA EL LIMITE ECONDMICO,AVHLU(PIE^2*1000)=";AVHLU
790 PRINT "PETROLEO IN SITU. OIP(B)=";OIP
791 PRINT "*****"
792 PRINT "FORMACION SOMETIDA A INYECCION CONTINUA DE VAPOR"
793 PRINT "PARAMETROS TERMICOS DE SALIDA"
794 FRINT "*****"
795 PRINT "TU";TAB(10);"AVHU";TAB(20);"DADTU";TAB(30);"NPVHU";TAB(40);
      "TPPE";TAB(50);"TQUTU";TAB(60);"TQPU"
796 PRINT "DIAS";TAB(10);"MPIE^2";TAB(20);"PIE^2/D";TAB(30)
      "MSTB";TAB(40);"STBD";TAB(50);"MBTU/HR";TAB(60);"MBTU/HR"
800 FOR T=INCT TO TL STEP INCT
810 TD=2*KOB*(T^.5)/(MFO*HFO*DOB^.5)
830 A1=(.3480242)
840 A2=(-.0958798)
850 A3=(.7478556)
860 P=(.47047)
870 U=(1+P*TD)^(-1)
880 TER1=A1*U+(A2*U^2)+(A3*U^3)
890 TERT=TER1+(2*TD/3.1416^.5)-1
900 AVH=TQI*MFO*HFO*DOB*TERT/(4*(KOB^2)*(TV-TY))
910 DADT=TQI*TER1/(MFO*HFO*(TV-TY))
920 ECV=1-FC*(1-EAV)*(1-SWI-SOI)
930 ECH=1-FC*(1-EAH)*(1-SWI-SOI)
980 VAL1=TQI*MFO*(HFO^2)*DOB*PORFO
990 VAL2=4*(KOB^2)*(TV-TY)*5.615*BO
1000 TERV=(SOI-SORV)*EVV*ECV
1010 TERH=(SOI-SORH)*EVH*ECH
1020 NPVH=VAL1*TERT*(TERV+TERH)/VAL2
1030 VAL3=24*TQI*PORFO
1040 VAL4=5.615*BO*MFO*(TV-TY)
1050 TPPE=VAL3*TER1*(TERV+TERH)/VAL4
1060 TQUT=TQI*TER1
1070 TQP=TQI-TQUT
1080 TU=T/24
1090 AVHU=AVH/1000
1100 DADTU=DADT*24
1110 NPVHU=NPVH/1000
1111 TQUTU=TQUT/1000
1112 TQPU=TQP/1000
1120 PRINT TAB(1);USING"####.#";TU;:PRINT TAB(10);USING"####.#";AVHU;:PRINT
      TAB(20);USING"####.#";DADTU;:PRINT TAB(30);USING"####.#";NPVHU;:
      PRINT TAB(40);USING"####.#";TPPE;:PRINT TAB(50);USING"####.#";TQUTU;:
1121 PRINT TAB(60);USING"####.#";TQPU
1130 NEXT T
1140 END

```



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



## SIMBOLOGIA UTILIZADA EN EL PROGRAMA (INVAFO.BAS)

- COV = Costo de generación de vapor, (dólares/MM Btu)
- PORFO = Porosidad de la formación, (fracción)
- SOI = Saturación de petróleo inicial, (fracción)
- DEPE = Densidad del petróleo (lb/pie<sup>3</sup>)
- CEPE = Calor específico del petróleo, (Btu/lb-°F)
- SWI = Saturación de agua inicial, (fracción)
- DEAG = Densidad del agua, (lb/pie<sup>3</sup>)
- CEAG = Calor específico del agua, (Btu/lb-°F)
- DEFO = Densidad de la formación, (lb/pie<sup>3</sup>)
- TV = Temperatura del vapor de inyección, (°F)
- TY = Temperatura inicial de la formación, (°F)
- COPE = Costo neto del petróleo desplazado, (dólares/Barril)
- AA = Area del arreglo sometido a inyección, (acres)
- SORV = Saturación del petróleo residual en la zona barrida por el vapor, (fracción)
- EAV = Eficiencia areal de la formación barrida por el vapor, (fracción)
- EZV1 = Eficiencia vertical de la formación barrida por el vapor expresada en (pie/zona)
- SORH = Saturación del petróleo residual en la zona barrida por el agua caliente, (fracción).
- EAH = Eficiencia areal de la formación barrida por el agua caliente, (fracción).
- TMVI = Tasa másica constante de vapor de inyección, (lb/hr).

- LATVI = Calor por unidad de masa de vapor disponible en el generador o calor latente del vapor saturado, (Btu/lb).
- HFO = Espesor promedio de la formación de interés, (pies)
- DOB = Difusividad térmica de las formaciones adyacentes, ( $\text{pie}^2/\text{hr}$ ).
- KOB = Conductividad térmica de las formaciones adyacentes, (Btu/hr-pie-°F)
- UPE = Viscosidad del petróleo, (cp)
- FC = Factor de captura, (adimensional)
- BO = Factor volumétrico del petróleo, (B/STB)
- ZP = Número de zonas productoras en el espesor promedio de formación, (zonas).
- MFO = Capacidad calorífica por unidad de volumen de la formación petrolífera, (Btu/pie<sup>3</sup>- °F)
- EZV = Eficiencia vertical en la zona barrida por el vapor, (fracción).
- EZH = Eficiencia vertical en la zona barrida por agua caliente, (fracción)
- EV = Eficiencia volumétrica en la zona barrida por el vapor, (fracción)
- EVH = Eficiencia volumétrica en la zona barrida por el agua caliente, (fracción).
- SORVH = Saturación de petróleo residual de la zona barrida por vapor y agua caliente, (fracción).
- CEFO = Calor específico de la formación (Btu/lb-°F)



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$TERTL = e^{(TDL)^2} \cdot ERFC(TDL) + \frac{2(TDL)}{\sqrt{\pi}} - 1, \text{ (adimensional)}$$

TL = Tiempo de inyección de vapor al límite económico, (horas)

TLU = TL expresado en (días).

TQI = Tasa de calor inyectado, (Btu/hr)

AVHL = Area de formación calentada por el vapor y agua caliente al límite económico, (pie<sup>2</sup>).

AVHLU = AVHL expresado en (pie<sup>2</sup> x 1,000)

OIP = Petróleo originalmente en el yacimiento, (B).

INCI = Incremento de tiempo utilizado en el lazo de tiempo del programa.

T = Tiempo de inyección de vapor,  $T \leq TL$ ; (horas)

TD = Tiempo adimensional,  $TD \leq TDL$ .

A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, P, U = Términos utilizados para calcular la aproximación de ERFC (TD) según ABRAMOWITZ y STEGUN.

$$TERT = e^{(TD)^2} \cdot ERFC(TD) ; \text{ (adimensional)}$$

$$TERT = e^{(TD)^2} \cdot ERFC(TD) + \frac{2 \cdot TD}{\sqrt{\pi}} - 1$$

AVH = Area de formación calentada por el vapor y el agua caliente, (pie<sup>2</sup>).

DADT = Variación del área calentada con el tiempo, (pie<sup>2</sup> / hr).

ECV = Eficiencia de captura en la zona barrida por el vapor, (fracción).

ECH = Eficiencia de captura en la zona barrida por el agua caliente, (fracción).



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

NPVH = Recuperación de petróleo a un tiempo  $t$ , debido al barrido del vapor y el agua caliente, (STB).

TPPE = Tasa de producción de petróleo a un tiempo  $t$ , (STBD)

TQUT = Tasa de calor utilizado, (Btu/hr)

TQP = Tasa de calor perdido, (Btu/hr).

TU =  $T$  expresado en (días)

AVHU = AVH expresado en ( $\text{pie}^2 \times 1,000$ )

DADTU = DADT expresado en ( $\text{pie}^2/\text{día}$ )

NPVHU = NPVH expresado en (STB  $\times 1,000$ )

TQUTU = TQUT expresado en (Btu/hr  $\times 1,000$ )

TQPU = TQP expresado en (Btu/hr  $\times 1,000$ )



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## CAPITULO IV

### ECONOMIA DEL PROYECTO

En el presente capítulo se establecerá el análisis económico de un proyecto de inyección continua de vapor según el estimado del NPC.

#### 4.1 ANALISIS ECONOMICO DEL MODELO UTILIZADO

El análisis económico según el NPC, para un proyecto de inyección continua de vapor debe tomar en consideración los siguientes costos :

i. COSTO DE DESARROLLO DEL CAMPO =  $A+B+C+D$

donde :

A = Costo de perforación, para el caso de un arreglo nuevo.

B = Costo de completación, para el caso de un arreglo nuevo.

C = Costo de trabajos de reacondicionamiento de los pozos de producción.

D = Costo de conversión de pozos de productor a inyector.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

ii. COSTO DE LOS EQUIPOS =  $E+F+G+H$

donde :

E = Costo de alquiler o costo de equipo de producción, para el caso de un arreglo nuevo.

F = Costo del equipo de control de contaminación

G = Costo del equipo de inyección.

D = Costo del equipo de generación de vapor.

iii. COSTO DE OPERACION Y MANTENIMIENTO DE LOS POZOS DE PRODUCCION DURANTE LA VIDA DEL PROYECTO =  $I . J$

donde :

I = Costo anual de operación y mantenimiento de los pozos de producción.

J = Vida del proyecto.

iv. COSTO DE LOS MATERIALES DE INYECCION =  $K . L$

donde :

K = Costo del barril de vapor

L = Vapor total requerido para el área invadida correspondiente.

v. SOBREPREGIO DEL PROYECTO =  $M+N+O$

donde :

M = Sobreprecio del costo de desarrollo del campo.

Está dado por el 10% del costo de desarrollo del campo.

N = Sobreprecio del costo de los equipos.

Está dado por el 10% del costo de los equipos

O = Sobreprecio del costo de operación y manteni  
mimiento de los pozos de producción durante la  
vida del proyecto.

vi. COSTO SUBTOTAL DEL PROYECTO =

Costo de desarrollo del campo + Costo de los equipos +  
Costos de operación y mantenimiento +  
Costo de los materiales de inyección + Sobreprecio del  
proyecto.

vii. OTROS COSTOS = P

donde :

P = Contingencias.

Está dado por el 10% del costo subtotal del  
proyecto.

viii. COSTO TOTAL DEL PROYECTO = Costo subtotal del pro-  
yecto + Otros costos.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como conclusiones tenemos:

- Los programas INVASU.BAS e INVAPO.BAS mediante interacciones de ensayo y error principalmente calculan pérdidas de calor en superficie y pozo, además calidad de vapor en el cabezal y cara de la arena en función de tiempo de inyección.

Estos resultados permiten rápidamente bajo cierta seguridad seleccionar un tipo de tubería superficial o de producción a utilizarse en un proyecto de inyección con tínua de vapor.

- El programa INVAFO.BAS, basándose en las ecuaciones del NPC trata de calcular la recuperación acumulada de petróleo versus tiempo hasta lograr el límite económico, límite que se lo determina a través de la ecuación de la Phillips Petroleum Co. y cuyos parámetros son determinados por análisis de costos, de muestras, pruebas de laboratorio, etc.

Los resultados de este programa tienen como principal objetivo predecir el comportamiento de un yacimiento so metido a inyección con tínua de vapor y a la vez establecer si la recuperación a tenerse justifica o nó la in-



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



versión.

FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA

- Estos programas han demostrado confiabilidad teórica ya que los datos de entrada y sus valores de salida junto con la estructura de los cálculos han sido probados por el autor mediante cálculos manuales tomando como referencia problemas desarrollados por :
  - a) Apuntes de clases de la ESPOL para comprobar INVASU. BAS.
  - b) El SPE reimpresión n° 10 para comprobar INVAPO. BAS.
  - c) El SPE reimpresión n° 7 para comprobar INVAFO. BAS.

Como recomendaciones tenemos :

- Así como las demostraciones de efectividad de métodos térmicos en el laboratorio no han sido observadas en el campo, de la misma manera estos programas al tener sus limitaciones teóricas, también tendrán cierto grado de efectividad en el campo, por tanto para futuros proyectos de recuperación de petróleo mediante inyección continua de vapor, será necesario comparar el comportamiento de los parámetros térmicos de entrada y salida de este modelo computarizado con el proyecto real y así determinar con precisión el grado de efectividad de este trabajo.



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

- Debido que la misión técnica de PetroCanada del departamento de petróleo pesado que visitó el Ecuador en 1982, recomendó considerar la inyección continua de vapor como método de recuperación de petróleo del campo PUNGARAYACU y dado que la presente tesis muestra un procedimiento de cálculo de este método recomendado, entonces se sugiere ingresar valores de un arreglo de pozos de este campo a los programas con el fin de obtener resultados que me indiquen el comportamiento de superficie, pozo y formación.
  
- Es necesario a corto plazo modificar la estructura del programa INVAFO.BAS con el objetivo de incluir consideraciones más reales que permitan enfocar mejor el proceso de inyección de vapor en la formación; así por ejemplo :
  - a) Se recomienda calcular la recuperación acumulada de petróleo no sólo considerando las zonas de vapor y agua caliente sino también incluyendo la zona de agua fría, para lograr esto se sugiere determinar en la formación la distribución de saturación de agua versus distancia radial al cuadrado para varios tiempos hasta el límite económico, y de esta manera calcular la recuperación acumulada de petróleo a dichos tiempos en (STB) utilizando la ecuación establecida por Willman y colaboradores,

dada por :

$$N_p = \frac{\pi \cdot h \cdot \phi}{5.615 \cdot \beta_o} \left[ \left[ S_{oi} - (S_{or})_v \right] r_v^2 + \int_{r_v}^{r_{\text{máx}}} (S_w - S_{wi}) dr^2 \right]$$

donde el primer término dentro del paréntesis representa la recuperación de la zona de vapor, y la integral la recuperación de las zonas de agua caliente y fría.

- b) Una vez obtenida la ecuación de recuperación acumulada de petróleo versus tiempo, se recomienda determinar la tasa de producción de petróleo derivando numéricamente  $N_p$  con respecto al tiempo, esto es :

$$\frac{dN_p}{dt} = q_o$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

- c) Después de calcular lo anterior se sugiere graficar :

$S_w$  versus  $r^2$  para varios  $t$

$N_p$  versus  $t$

$q_o$  versus  $t$  ;

Para mostrar los gráficos anteriores en el programa INVAFO. BAS, se necesita utilizar la hoja electrónica que para IBM es conocida como LOTUS.

A P E N D I C E S



**BIBLIOTECA FICT**  
**ESPOL**

## APENDICE A

### DEDUCCION DE LAS EXPRESIONES : VOLUMEN DE FORMACION PETROLIFERA CALENTADA Y VARIACION DEL VOLUMEN DE FORMACION PETROLIFERA CALENTADA CON EL TIEMPO

#### A.1 VOLUMEN DE FORMACION PETROLIFERA CALENTADA $V(t)$

A continuación deduciremos la ecuación que servirá para calcular el volumen de formación petrolífera calentada  $V(t)$ , considerando el balance de calor

$\dot{Q}_I = \dot{Q}_P + \dot{Q}_U$  como el proceso que más se iguala al comportamiento de energía en el sistema pozo-formación petrolífera-formaciones adyacentes.

Por tanto si partimos de la ecuación (1.100) dada por :  $\dot{Q}_I = \dot{Q}_P + \dot{Q}_U$  , entonces tendremos:



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

a) La tasa de pérdidas de calor a las formaciones adyacentes al tiempo  $(t)$ , expresada en términos de  $(V)$ , viene dada por (1.128) :

$$\dot{Q}_P = 2 \int_0^{V(t)} \frac{K_{ob} \cdot \Delta T}{h\sqrt{\pi D_{ob} t}} dV, \text{ ya que } (V) \text{ es función de } (t)$$

expresaré  $(\dot{Q}_P)$  en términos de  $(t)$  y tendré :

$$\dot{Q}_P = 2 \int_0^t \frac{K_{Ob} \cdot \Delta T}{h \sqrt{\pi D_{Ob} t}} \frac{dV}{dt} \cdot dt \quad (1)$$

Si considero  $\frac{K_{Ob} \cdot \Delta T}{h \sqrt{\pi D_{Ob}}} = C_1$ , entonces :

$$\dot{Q}_P = 2 \int_0^t \frac{K_{Ob} \cdot \Delta T}{h \sqrt{\pi D_{Ob}} \sqrt{t}} \frac{dV}{dt} \cdot dt = 2C_1 \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t}} \frac{dV}{dt} \cdot dt \quad (2)$$

b) La tasa de utilización de calor o de calentamiento de la formación petrolífera al tiempo (t), viene dada por (1.131), es decir :

$$\dot{Q}_U = M \Delta T \frac{dV}{dt}$$

si considero  $M \Delta T = C_2$ , entonces :

$$\dot{Q}_U = C_2 \frac{dV}{dt}$$



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

c) La tasa de inyección de calor viene dado por:  $\dot{Q}_I$   
Reemplazando (2) y (3) en (1.100) la ecuación del balance de calor quedará :

$$\dot{Q}_I = 2C_1 \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t}} \frac{dV}{dt} \cdot dt + C_2 \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

Tomando la Transformada de Laplace de la ecuación completa se tiene:



$$\mathcal{L}(\dot{Q}_I) = \mathcal{L}\left[2C_1 \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot \frac{dV}{dt} \cdot dt\right] + \mathcal{L}\left[C_2 \frac{dV}{dt}\right] \quad (5)$$

Resolviendo las transformadas de cada término :

$$\text{i. } \mathcal{L}(\dot{Q}_I) = \frac{\dot{Q}_I}{S} \quad (6)$$

$$\text{ii. } \mathcal{L}\left[2C_1 \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t}} \frac{dV}{dt} dt\right] = ? ;$$

ya que esta transformada correspondiente a  $(\dot{Q}_P)$  en términos de  $(t)$ , no puede ser evaluada directamente, tendrá que ser arreglada consistentemente con el objeto de que cumpla con alguna propiedad de las transformadas; por lo tanto  $(\dot{Q}_P)$  a un tiempo  $u < t$ , correspondiente al volumen elemental  $dV$  viene dada por :

$$\dot{Q}_P = 2C_1 \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-u}} \frac{dV}{du} \cdot du$$

luego :

$$\mathcal{L}\left[2C_1 \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot \frac{dV}{dt} \cdot dt\right] = \mathcal{L}\left[2C_1 \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-u}} \cdot \frac{dV}{du} \cdot du\right] = ? \quad (8)$$

De las propiedades de las transformadas de Laplace :



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$\mathcal{L} \left[ \int_0^t f(u)g(t-u)du \right] = \mathcal{L} [f(t)] \cdot \mathcal{L} [g(t)] \quad (9)$$

por analogía con (8):

$$f(u) = \frac{dV}{du} ; \text{ donde } f(t) = \frac{dV}{dt}$$

$$g(t-u) = \frac{1}{\sqrt{t-u}} ; \text{ donde } g(t) = \frac{1}{\sqrt{t}}$$

Aplicando (9) a (8) tendremos :

$$\begin{aligned} \mathcal{L} \left[ 2C_1 \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-u}} \cdot \frac{dV}{du} \cdot du \right] &= 2C_1 \mathcal{L} \left[ \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-u}} \cdot \frac{dV}{du} \cdot du \right] = \\ &= 2C_1 \mathcal{L} \left[ \frac{dV}{dt} \right] \mathcal{L} \left[ \frac{1}{\sqrt{t}} \right] = 2C_1 \mathcal{L} \left[ \frac{dV}{dt} \right] \cdot \mathcal{L} (t^{-1/2}) = \\ &= 2C_1 \left[ s\hat{V}(s) - V(0) \right] \left[ \sqrt{\pi/s} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{iii. } \mathcal{L} \left[ C_2 \frac{dV}{dt} \right] = C_2 \mathcal{L} \left[ \frac{dV}{dt} \right] = C_2 \left[ s\hat{V}(s) - V(0) \right] \quad (11)$$

Reemplazando (6), (10), y (11) en (5) tendremos la ecuación completa transformada en términos del volumen de formación petrolífera calentada transformada  $\hat{V}(S)$ .



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$\frac{\dot{Q}_I}{S} = 2C_1 \left[ S \hat{V}(S) - V(0) \right] \left[ \sqrt{\pi/S} \right] + C_2 \left[ S \hat{V}(S) - V(0) \right] \quad (12)$$

Si  $V(t) = 0$ , para  $t = \text{tiempo de inyección} = 0$ , luego  $V(0) = 0$

entonces:

$$\frac{\dot{Q}_I}{S} = 2C_1 S \hat{V}(S) \sqrt{\frac{\pi}{S}} + C_2 S \hat{V}(S) \quad (13)$$

despejando:

$$\hat{V}(S) = \frac{\dot{Q}_I/S}{2\sqrt{\frac{\pi}{S}} C_1 S + C_2 S} = \frac{\dot{Q}_I}{2\sqrt{\pi} C_1 S^{3/2} + S^2 C_2} \quad (14)$$

rearrreglando :

$$\hat{V}(S) = \frac{\dot{Q}_I}{2\sqrt{\pi} C_1 [\sqrt{S} (S-0^2)] + S^2 C_2}$$



BIBLIOTECA FICTICIA  
ESPOL (15)

Aplicando artificios que no alteran (15) tendremos :

$$\hat{V}(S) = \frac{C_2}{4\pi C_1^2} \left[ \frac{(2\sqrt{\pi} C_1)^2}{C_2} - 0^2 \right] \frac{1}{C_2} \cdot \frac{\dot{Q}_I}{2\sqrt{\pi} C_1 [\sqrt{S} (S-0^2)] + S^2 C_2}$$

$$\hat{V}(S) = \frac{\dot{Q}_I C_2 \left[ \frac{2\sqrt{\pi} C_1}{C_2} \right]^2 - 0^2}{4\pi C_1^2 \sqrt{S} (S-0^2) \left[ \frac{2\sqrt{\pi} C_1}{C_2} + \sqrt{S} \right]}$$

$\begin{matrix} \downarrow b & \downarrow a \\ \uparrow a & \uparrow b \end{matrix}$

Calculando la transformada inversa del paso anterior :

$$\mathcal{L}^{-1} \left[ \hat{V}(s) \right] = V(t) = \frac{\overset{\circ}{Q}_I C_2}{4\pi C_1^2} \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{\frac{2\sqrt{\pi}C_1}{C_2} (s^2 - 0^2)}{\sqrt{s} (s-0^2) \frac{2\sqrt{\pi}C_1}{C_2} + \sqrt{s}} \right] \quad (16)$$

Si considero  $\frac{2\sqrt{\pi}C_1}{C_2} = b$  y  $0 = a$  tendremos :

$$V(t) = \frac{\overset{\circ}{Q}_I C_2}{4\pi C_1^2} \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{b^2 - a^2}{\sqrt{s} (s-a^2) (b+\sqrt{s})} \right] \quad (17)$$

Escrita en esta forma, la expresión es similar a la de la lista de transformadas a saber :

$$\mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{b^2 - a^2}{\sqrt{s} (s-a^2) (\sqrt{s}+b)} \right] = \text{EXP}(a^2 t) \left[ \frac{b}{a} \text{ERF}(a\sqrt{t}) - 1 \right] + \text{EXP}(b^2 t) \text{ERFC}(b\sqrt{t})$$

Aplicando (18 a (17):

$$V(t) = \frac{\overset{\circ}{Q}_I C_2}{4\pi C_1^2} \left[ \text{EXP}(a^2 t) \left[ \frac{b}{a} \text{ERF}(a\sqrt{t}) - 1 \right] + \text{EXP}(b^2 t) \text{ERFC}(b\sqrt{t}) \right]$$

$$V(t) = \frac{\overset{\circ}{Q}_I C_2}{4\pi C_1^2} \left[ \text{EXP}(a^2 t) \cdot \frac{b}{a} \text{ERF}(a\sqrt{t}) - \text{EXP}(a^2 t) + \text{EXP}(b^2 t) \text{ERFC}(b\sqrt{t}) \right] \quad (19)$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Reemplazando los valores de a y b en (19) notaremos que el término  $\text{ERF}(a\sqrt{t})$  representado por su expansión asintótica

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n a^{2n+1} t^{(2n+1)/2}}{n! (2n+1)}$$

se vuelve indefinida en  $a=0$ , por lo que realmente se necesitará evaluar :

$$\lim_{a \rightarrow 0} \frac{1}{a} \left[ \text{ERF}(a\sqrt{t}) \right], \text{ por tanto}$$

$$V(t) = \frac{\overset{\circ}{Q}_I C_2}{4\pi C_1^2} \left[ \text{EXP}(0) \cdot \frac{2\sqrt{\pi}C_1}{C_2} \cdot \lim_{a \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{a} \text{ERF}(a\sqrt{t}) \right] - \text{EXP}(0) + \right. \\ \left. + \text{EXP} \left[ \frac{2\sqrt{\pi}C_1}{C_2} \right]^2 t \cdot \text{ERFC} \left[ \frac{2\sqrt{\pi}C_1}{C_2} \sqrt{t} \right] \right] \quad (20)$$

$$V(t) = \frac{\overset{\circ}{Q}_I C_2}{4\pi C_1^2} \left[ \frac{2\sqrt{\pi}C_1}{C_2} \lim_{a \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{a} \text{ERF}(a\sqrt{t}) \right] - 1 + \right. \\ \left. + \text{EXP} \left[ \frac{2\sqrt{\pi}C_1}{C_2} \right]^2 t \cdot \text{ERFC} \left[ \frac{2\sqrt{\pi}C_1}{C_2} \sqrt{t} \right] \right] \quad (21)$$

En esta expresión se necesita evaluar  $\lim_{a \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{a} \text{ERF}(a\sqrt{t}) \right]$

pero antes necesito usar la expansión asintótica para:



BIBLIOTECA FICTICIA  
ESPOL

$$\text{ERF}(a\sqrt{t}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n a^{2n+1} t^{(2n+1)/2}}{n! (2n+1)} \quad (22)$$

$$= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ a t^{1/2} - \frac{a^3 t^{3/2}}{3} + \dots \text{términos con } (a) \right] \quad (23)$$

luego :

$$\begin{aligned} \frac{1}{a} \text{ERF}(a\sqrt{t}) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \frac{1}{a} a t^{1/2} - \frac{1}{a} \frac{a^3 t^{3/2}}{3} + \dots \right] \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ t^{1/2} - \frac{a^2 t^{3/2}}{3} + \dots \text{términos con } (a) \right] \quad (24) \end{aligned}$$

Por tanto :

$$\begin{aligned} \lim_{a \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{a} \text{ERF}(a\sqrt{t}) \right] &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \lim_{a \rightarrow 0} \left[ t^{1/2} - \frac{a^2 t^{3/2}}{3} + \dots \text{términos con } (a) \right] \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{t} = 2 \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} \quad (25) \end{aligned}$$

Reemplazando el término (25) en (21) tendremos :

$$V(t) = \frac{Q_I C_2}{4\pi C_1^2} \left[ \frac{2\sqrt{\pi} C_1}{C_2} \cdot \frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} - 1 + \text{EXP} \left[ \frac{2\sqrt{\pi} C_1}{C_2} \right]^2 \cdot t \text{ERFC} \left[ \frac{2\sqrt{\pi} C_1}{C_2} \cdot \sqrt{t} \right] \right] \quad (26)$$

$$\text{Reemplazando } C_1 = \frac{K_{Ob} \Delta T}{h \sqrt{\pi} D_{Ob}} \quad \text{y} \quad C_2 = M \Delta T$$

en la ecuación anterior :

$$V(t) = \frac{\dot{Q}_I (M \Delta T)}{4\pi \left[ \frac{K_{ob}^2 \Delta T^2}{h^2 \pi D_{ob}} \right]} \left[ \frac{2\sqrt{\pi}}{(M \Delta T)} \left[ \frac{K_{ob} \Delta T}{h \sqrt{\pi D_{ob}}} \right] \frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} - 1 + \right. \\ \left. + \text{EXP} \left[ \frac{4\pi}{(M^2 \Delta T^2)} \left[ \frac{K_{ob}^2 \Delta T^2}{h^2 \pi D_{ob}} \right] t \right] \cdot \text{ERFC} \left[ \frac{2\sqrt{\pi}}{(M \Delta T)} \left[ \frac{K_{ob} \Delta T}{h \sqrt{\pi D_{ob}}} \right] \cdot \sqrt{t} \right] \right]$$

Simplificando :

2

$$V(t) = \frac{\dot{Q}_I M h^2 D_{ob}}{4 K_{ob}^2 \Delta T} \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \frac{2K_{ob}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] - 1 + \text{EXP} \left[ \frac{2K_{ob}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] \text{ERFC} \left[ \frac{2K_{ob}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] \right]$$

Ordenando tendremos volumen de formación calentada :

2

$$V(t) = \frac{\dot{Q}_I M h^2 D_{ob}}{4 K_{ob}^2 \Delta T} \left[ \text{EXP} \left[ \frac{2K_{ob}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] \text{ERFC} \left[ \frac{2K_{ob}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \frac{2K_{ob}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] - 1 \right] \quad (27)$$

Reemplazando  $V(t) = A(t) \cdot h$  tendremos área de formación calentada :

2

$$A(t) = \frac{\dot{Q}_I M h D_{ob}}{4 K_{ob}^2 \Delta T} \left[ \text{EXP} \left[ \frac{2K_{ob}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] \text{ERFC} \left[ \frac{2K_{ob}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \frac{2K_{ob}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] - 1 \right] \quad (28)$$

$$\text{Si considero } t_D = \frac{2K_{ob}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \quad (29)$$



$$y \quad \Delta T = T_v - T_y$$

entonces :

$$V(t) = \frac{\dot{Q}_I M h^2 D_{ob}}{4K_{ob}^2(T_v - T_y)} \left[ \text{EXP} (t_D^2) \text{ERFC } t_D + \frac{2}{\sqrt{\pi}} t_D - 1 \right] \quad (30)$$

$$A(t) = \frac{\dot{Q}_I M h D_{ob}}{4K_{ob}^2(T_v - T_y)} \left[ \text{EXP} (t_D^2) \text{ERFC } t_D + \frac{2}{\sqrt{\pi}} t_D - 1 \right] \quad (31)$$

donde :

$A(t)$  = Area de formación petrolífera calentada,  $\text{pie}^2$ .

$\dot{Q}_I$  = Tasa constante de inyección de calor, Btu/hr.

$M$  = Capacidad calorífica por unidad de volumen de la formación petrolífera,  $\text{Btu}/\text{pie}^3 - ^\circ\text{F}$ .

$h$  = Espesor promedio de la formación, pies.

$D_{ob}, K_{ob}$  = Difusividad y conductividad térmica de las formaciones adyacentes en  $\text{pie}^2/\text{hr}$  y  $\text{Btu}/\text{hr-pie-}^\circ\text{F}$ .

$T_v, T_y$  = Temperaturas del vapor y yacimiento,  $^\circ\text{F}$ .

$t_D$  = Tiempo adimensional, dado por la ecuación (29) :

$$t_D = \frac{2K_{ob}\sqrt{t}}{Mh\sqrt{D_{ob}}}$$

donde :

$t_D$  = Tiempo de inyección del vapor, hr.

El resto de variables ya fueron definidas anteriormente.

A.2 CALCULO DE LA VARIACION DEL VOLUMEN DE FORMACION PETROLIFERA CALENTADA CON EL TIEMPO.

Si el volumen calentado está dado por :

$$V(t) = \frac{\dot{Q}_T M h^2 D_{ob}}{4K_{ob}^2 (T_v - T_y)} \left[ \text{EXP} \left[ \frac{4K_{ob}^2 t}{M^2 h^2 D_{ob}} \right] \text{ERFC} \left[ \frac{2K_{ob} \sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \frac{2K_{ob} \sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] - 1 \right]$$

Entonces la variación del volumen calentado con el tiempo estará dado por la derivada de  $V(t)$  con respecto a  $t$ , por tanto :

$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} = & \frac{\dot{Q}_T M h^2 D_{ob}}{4K_{ob}^2 (T_v - T_y)} \left[ \text{EXP} \left[ \frac{4K_{ob}^2 t}{M^2 h^2 D_{ob}} \right] \frac{d}{dt} \left[ \text{ERFC} \frac{2K_{ob} \sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] + \dots \right. \\ & \left. + \text{ERFC} \left[ \frac{2K_{ob} \sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] \frac{d}{dt} \left[ \text{EXP} \frac{4K_{ob}^2 t}{M^2 h^2 D_{ob}} \right] \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{d}{dt} \left[ \frac{2K_{ob} \sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] - \frac{d}{dt} (1) \right] \quad (32) \end{aligned}$$

Resolviendo las derivadas del lado derecho de (32) tendremos :

a)  $\frac{d}{dt} \left[ \text{ERFC} \frac{2K_{ob} \sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{ob}}} \right] =$

Antes de resolver esta derivada es necesario determinar primero la función error complementaria o sea:



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$\text{ERFC} \left[ \frac{2K_{\text{ob}}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}} \right] = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{2K_{\text{ob}}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}}} \text{EXP} \left[ -\frac{2K_{\text{ob}}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}} \right] d \left[ \frac{2K_{\text{ob}}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}} \right]$$

luego :

$$\frac{d}{dt} \left[ \text{ERFC} \frac{2K_{\text{ob}}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}} \right] = \frac{d}{dt} (1) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{d}{dt} \int_0^{\frac{2K_{\text{ob}}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}}} \text{EXP} \left[ -\frac{4K_{\text{ob}}^2 t}{M^2 h^2 D_{\text{ob}}} \right] d \left[ \frac{2K_{\text{ob}}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}} \right]$$

para poder evaluar la derivada de la integral necesito expresar :

$$d \left[ \frac{2K_{\text{ob}}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}} \right] \text{ en términos de } (dt) \text{ por tanto :}$$

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{2K_{\text{ob}}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}} \right] = \frac{2K_{\text{ob}}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}} \cdot \frac{1}{2} t^{-1/2}$$

BIBLIOTECA



luego :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[ \text{ERFC} \frac{2K_{\text{ob}}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}} \right] &= - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{d}{dt} \int_0^{\frac{2K_{\text{ob}}\sqrt{t}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}}} \text{EXP} \left[ -\frac{4K_{\text{ob}}^2 t}{M^2 h^2 D_{\text{ob}}} \right] \cdot \left[ \frac{K_{\text{ob}}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}} t^{-1/2} \right] dt \\ &= - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \text{EXP} \left[ -\frac{4K_{\text{ob}}^2 t}{M^2 h^2 D_{\text{ob}}} \right] \cdot \left[ \frac{K_{\text{ob}}}{M h \sqrt{D_{\text{ob}}}} t^{-1/2} \right] \end{aligned}$$

FACULTAD DE ING.  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA

$$b) \frac{d}{dt} \left[ \text{EXP} \frac{4K_{\text{ob}}^2 t}{M^2 h^2 D_{\text{ob}}} \right] = \text{EXP} \left[ \frac{4K_{\text{ob}}^2 t}{M^2 h^2 D_{\text{ob}}} \right] \cdot \frac{4K_{\text{ob}}^2}{M^2 h^2 D_{\text{ob}}}$$

$$c) \frac{d}{dt} \left[ \frac{2K_{ob} \sqrt{t}}{Mh \sqrt{D_{ob}}} \right] = \frac{2K_{ob}}{Mh \sqrt{D_{ob}}} \left[ \frac{1}{2} t^{-1/2} \right] = \frac{K_{ob}}{Mh \sqrt{D_{ob}}} t^{-1/2}$$



$$d) \frac{d}{dt} (1) = 0$$

BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Reemplazando estas derivadas en (32) y cancelando :

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{\dot{Q}_I M h^2 D_{ob}}{4 K_{ob}^2 (T_v - T_y)} \left[ \text{EXP} \left[ \frac{4K_{ob}^2 t}{M^2 h^2 D_{ob}} \right] \cdot \text{EXP} \left[ -\frac{4K_{ob}^2 t}{M^2 h^2 D_{ob}} \right] \left[ \frac{K_{ob}}{Mh \sqrt{D_{ob}}} t^{-1/2} \right] \right]$$

$$\left[ -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right] + \text{ERFC} \left[ \frac{2K_{ob} \sqrt{t}}{Mh \sqrt{D_{ob}}} \right] \cdot \text{EXP} \left[ \frac{4K_{ob}^2 t}{M^2 h^2 D_{ob}} \right] \cdot \left[ \frac{4K_{ob}^2}{M^2 h^2 D_{ob}} \right] + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{K_{ob}}{Mh \sqrt{D_{ob}}} t^{-1/2}$$

$$\frac{d}{dt} V(t) = \frac{\dot{Q}_I}{M(T_v - T_y)} \left[ \text{EXP} \left[ \frac{4K_{ob}^2 t}{M^2 h^2 D_{ob}} \right] \cdot \text{ERFC} \left[ \frac{2K_{ob} \sqrt{t}}{Mh \sqrt{D_{ob}}} \right] \right] \quad (33)$$

Expresado en términos del tiempo adimensional dado en (29) tendremos la variación del volumen calentado con el tiempo, es decir :

$$\frac{d}{dt} V(t) = \frac{\dot{Q}_I}{Mh (T_v - T_y)} \left[ \text{EXP} (t_D^2) \cdot \text{ERFC} t_D \right] \quad (34)$$

Reemplazando  $V(t) = A(t) \cdot h$  tendremos variación del área calentada con el tiempo, es decir :

$$\frac{d}{dt} A(t) = \frac{\dot{Q}_I}{M h (T_v - T_y)} \left[ \text{EXP} (t_D^2) \cdot \text{ERFC } t_D \right] \quad (35)$$

donde:

$\frac{d}{dt} A(t)$  = Variación del área de formación petrolífera calentada con el tiempo, pie<sup>2</sup>/hr.

$\dot{Q}_I$  = Tasa de inyección de calor al tiempo t, Btu/hr.

El resto de variables fueron definidas anteriormente.

## BIBLIOGRAFIA



1. B. P. Abad, Inyección de vapor (alternada y continúa) (Guayaquil : ESPOL, reimpresión 1985), vol. 2.
2. ARPEL XXXII, Estudio de inyección de vapor, Manantiales BEHR IIIb, Proyecto piloto (Buenos Aires, Sept. 1979),
3. Ali Farouq, Oil recovery by steam injection (Bradford, Pennsylvania : Producers Publishing Company, 1970).
4. Ali Farouq, Elements of thermal oil recovery (University of Alberta, Sept. 1979).
5. J. Ferrer, Notas sobre recuperación secundaria de petróleo, desplazamientos miscibles y recuperación térmica (Maracaibo, Venezuela : Univ. de Zulia, reimpresión, 1985).
6. A. S. Finol, Recuperación térmica de petróleo (Maracaibo, Venezuela, Julio 1975).
7. F. S. Johnson y C.J. Walker, "Oil vaporization during steam flooding", Transactions SPE-AIME, Vol. 251 (Dallas : SPE, 1971), pp. 731-742.

8. J. W. Marx y R. H. Langenheim, "Reservoir heating by hot fluid injection", Petroleum Transactions reprint series, N° 7 (Lawrence, Kansas : U. of Kansas), pp. 150-153.
9. Ch. R. Smith, Secondary oil recovery (Huntington, New York : Robert E. Krieger Publishing Company, 1975).
10. World Oil, Thermal recovery handbook, "How to quickly estimate steam drive oil recovery, por W. H. Fairfield" (Houston, Texas : Gulf Publishing Company, 1969), pp. 48-52.