

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE PETROLEO



TESIS DE GRADO PARA OPTAR EL TITULO DE:
INGENIERO DE PETROLEO

Aplicación de la Computadora Electrónica
para predecir el comportamiento de un Reservorio
Estratificado "X" que produce por influjo de agua

PRESENTADO POR
JORGE FLORES GONZALES
Promoción "Ing. Juan Rodríguez del Castillo"

LIMA - PERU 1964

**A MIS QUERIDOS
PADRES**

AGRADECIMIENTO

Cabe agradecer de modo preferencial al Ing. Juan Rodríguez del Castillo, Decano de la Facultad de Petróleo, tanto por la facilidad que me ha dado para el estudio del uso y manejo de la Computadora Electrónica 1620 de la Universidad Nacional de Ingeniería cuanto por todos los consejos, enseñanzas y recomendaciones que de él he recibido.

También expreso mi eterna gratitud a todos los Señores Profesores de la Facultad de Petróleo por toda la ayuda y enseñanzas que ellos me han proporcionado para la culminación de mi Carrera Profesional.

INDICE

PAGINA

INTRODUCCION.-

CAPITULO I.-	DESCRIPCION ANALITICA DEL METODO DE STII-S.-	1-7
	<ul style="list-style-type: none">-Asunciones del método.-Recuperación fraccional.-Fracción de producción de agua en la superficie.-Fracción de producción de agua en el reservorio.	
CAPITULO II.-	CARACTERISTICAS GENERALES DEL RESERVOIRIO "X".-	8-13
	<ul style="list-style-type: none">-Evaluación del aceite inicial - in situ.-Saturación del aceite despues de la recuperación primaria.-Regimen de inyección y eficiencia de barrido.	
CAPITULO III.-	SOLUCION ANALITICA DE LOS CALCULOS QUE REALIZARA LA COMPUTADORA.-	14-20
CAPITULO IV.-	PROGRAMA FORTRAN.-	21-43
	<ul style="list-style-type: none">-Procedimiento.-Obtención del Programa Objeto.-Diagrama de flujo.-Proposiciones Fortran.	
CAPITULO V.-	ENTRADA DE DATOS PARA EL PROGRAMA BASE.-	44-46
	<ul style="list-style-type: none">-Datos del reservorio.-Datos de espesor y permeabilidad para cada estrato.	

CAPITULO VI.- ESTUDIO COMPARATIVO DE TODOS LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA COMPUTADORA.-	47-51
-Cambio de la permeabilidad relativa.	
-Cambio de la saturación ini- cial del acuífero.	
-Cambio de la saturación de agua intersticial.	
-Cambio del régimen de inyección de agua.	
CAPITULO VII.- ANALISIS DEL COSTO DE LA SO- LUCION DEL PROGRAMA FURTRAN.-	52-53
CONCLUSIONES.-	54-56
NOMENCLATURA.-	
REFERENCIAS.-	

INTRODUCCION

Hoy en día, las computadoras electrónicas son ampliamente utilizadas para resolver los problemas de la ciencia, la ingeniería y el comercio. Su uso está basado en la capacidad para operar a gran velocidad, para obtener resultados con bastante precisión, para almacenar grandes cantidades de información y para llevar a cabo secuencias de operaciones largas y complejas gracias a su gran poder de combinación; todo ello sin la intervención humana .

Aprovechando entonces las múltiples capacidades de la computadora, se puede hacer uso de ella específicamente en la Ingeniería de Petróleo; para determinar parámetros y factores óptimos de producción, predecir el comportamiento de un reservorio, cálculos de liberación flash, análisis de curvas de declinación, diseño de tubería revestidora; y en todo aquello donde se tenga demasiadas variables y los cálculos sean bastante complejos como para obtener resultados con gran exactitud.

En la presente tesis se desarrolla un Programa Fortran basado en el Método de Stiles; para predecir el comportamiento de un reservorio estratificado que produce por influjo de agua, utilizando la computadora electrónica 1620. Se pretende principalmente que el desarrollo del programa Fortran

constituya una guía y un punto de partida para futuras aplicaciones de la computadora; porque es innegable que en un futuro no muy lejano todos los problemas de Ingeniería de Petróleo serán resueltos con la ayuda de una computadora electrónica.

Se cree inclusive que para el año de 1971, la computadora se aplicará en campos insospechados tales como: en el descubrimiento de nuevos teoremas, en traducción de lenguaje y en investigación psicológica.

La ciencia, además, sigue trabajando en otros modelos que, según se predica, desarrollarán su propia intuición y tomarán decisiones por sí mismos.

Surge entonces una rara interrogante: ¿Existe el peligro de que algún día las computadoras aventajen al hombre?. La solución de esta interrogante la tiene precisamente: el hombre.

CAPITULO I

DESCRIPCION ANALITICA DEL METODO DE STILES

El Método de Stiles se refiere a un estudio hecho principalmente para el cálculo de la recuperación y de la fracción de producción de agua de un sistema estratificado que produce por influjo de agua. Evidentemente, muchas zonas de producción son variables en permeabilidad tanto vertical como horizontal; y donde existe tales permeabilidades y estratificaciones el desplazamiento de agua será más rápido a través de las zonas más permeables y consecuentemente mucho del aceite en las zonas menos permeables debe ser producido en un período largo con una alta relación agua-aceite.

La situación es la misma si el agua viene de un influjo natural ó de sistemas de inyección los cuales son conocidos como mantenimiento de presión cuando la presión del reservorio es regularmente alta; y recuperación secundaria cuando la presión del reservorio es baja o depleta.

Como todos los métodos teóricos para problemas de reservorios; el estudio de Stiles hace varias suposiciones;

las cuáles son necesarias para desarrollar los conceptos y para derivar las ecuaciones.

ASUMCIONES DEL METODO

Las asunciones relativas al Método de Stiles son:

- a).- El sistema del flujo corresponde al de geometría plana, es decir, se asume un flujo horizontal.
- b).- El avance del frente de inundación en cualquier zona es proporcional a la permeabilidad absoluta de aquella zona.
- c).- Todas las capas tienen la misma porosidad.
- d).- Todas las capas tienen la misma permeabilidad relativa al aceite delante del frente de inundación y la misma permeabilidad relativa al agua detrás del frente de inundación.
- e).- Todas las capas sufren el mismo cambio en la saturación de aceite, debido al desplazamiento del agua.
- f).- No hay flujo transversal entre las capas o estratos, es decir, la permeabilidad vertical es cero.
- g).- La producción de cualquier zona en los pozos, cambia bruscamente de aceite a agua.
- h).- La fracción de producción de agua (water cut), en cualquier tiempo depende de la capacidad piezométrica y de la zona que está fluyendo aceite y de la capacidad piezométrica y de la zona que está produciendo

agua.

RECUPERACION FRACCIONAL

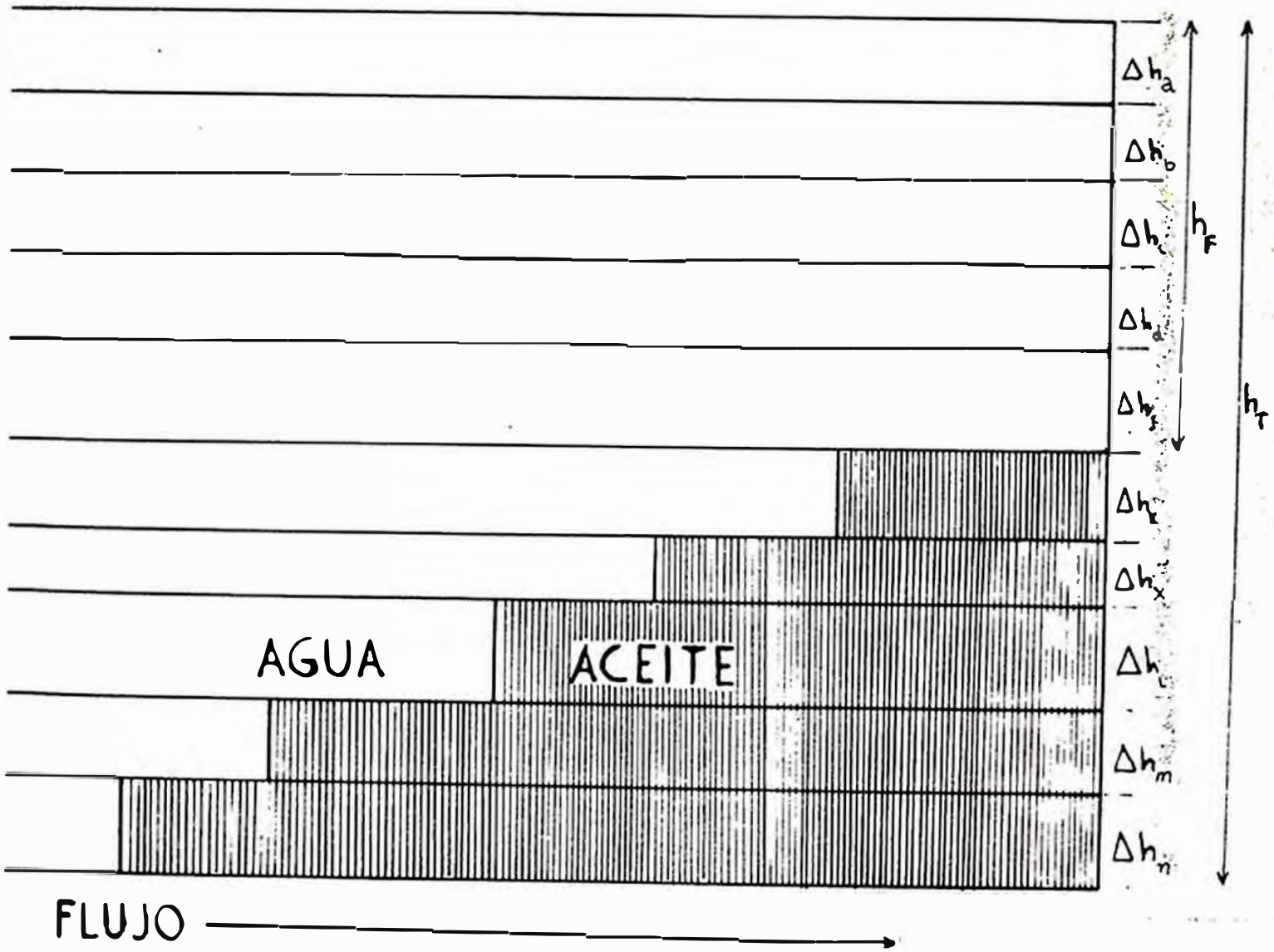
Aplicando el método de Stiles, dado una serie de capas o estratos paralelos de espesores $\Delta h_a, \Delta h_b, \Delta h_c$ etc y de permeabilidades K_a, K_b, K_c etc y ordenados, por conveniencia, en forma decreciente; la primera capa de permeabilidad K_a será primero barrida por el agua; luego será la segunda y así sucesivamente.

En la FIG. 1, se observa que las capas más permeables están produciendo agua y las demás están produciendo aceite. Las posiciones de los frentes de inundación están indicados para cada capa. Cuando la capa j ha pasado justo a la producción de agua, la producción de su aceite recuperable (por desplazamiento de agua), junto con la producción de las demás capas de permeabilidad más alta es completa. Dado que la velocidad de los frentes de inundación es asumida proporcional a las permeabilidades absolutas de los estratos; la recuperación fraccional en la capa k será :

$$\Delta h_k = \frac{K_k}{K_j}$$

Entonces cuando la capa k esté completamente inundada; es decir, cuando $K_k = K_j$ la recuperación de la capa k será -

FIGURA 1



Δh_k . Consecuentemente la recuperación fraccional de todas las capas, considerando totalmente inundado hasta la capa j es:

$$R = \frac{(\Delta h_a + \Delta h_b + \dots + \Delta h_j) + (\Delta h_k \frac{K_k}{K_j} + \Delta h_1 \frac{K_1}{K_j} + \dots + \Delta h_n \frac{K_n}{K_j})}{\Delta h_a + \Delta h_b + \dots + \Delta h_n}$$

Si en la expresión anterior se toma en cuenta la capacidad total de la formación " c_T " y la capacidad de la zona totalmente inundada " c_F "; y además se hace:

$$\Delta h_a + \Delta h_b + \dots + \Delta h_j = h_F$$

$$\Delta h_a + \Delta h_b + \dots + \Delta h_n = h_T$$

La expresión se transforma en:

$$R = \frac{h_F + \frac{1}{K_j} (\Delta h_k K_k + \Delta h_1 K_1 + \dots + \Delta h_n K_n)}{h_T}$$

Finalmente:

$$R = \frac{h_F K_j + (c_T - c_F)}{h_T K_j} \dots \dots \dots (1)$$

FRACCION DE PRODUCCION DE AGUA EN LA SUPERFICIE

La fracción de la producción de agua en la superficie (surface water out); puede ser expresado por medio de la forma lineal de la ley de Darcy. Se tiene:

$$f_v = \frac{q_v}{q_v + q_o}$$

pero:

$$q_v = \frac{1.127 a \Delta P \times \sum K_v \Delta h_v}{\mu_v L}$$

$$q_o = \frac{1.127 a \Delta P \times \sum K_o \Delta h_o}{\mu_o L A_o}$$

Entonces:

$$\frac{q_v}{q_v + q_o} = \frac{\frac{\sum K_v \Delta h_v}{\mu_v}}{\frac{K_v \Delta h_v}{\mu_v} + \frac{K_o \Delta h_o}{\mu_o A_o}}$$

Además el valor de la permeabilidad efectiva, en función de la permeabilidad absoluta es:

$$K_v = K \times K_{fv}$$

$$K_o = K \times K_{fo}$$

Reemplazando:

$$\begin{aligned}
 & \frac{K_{zw}}{\mu_w} \times \sum R \Delta h_w \\
 \hline
 & \frac{K_{zw}}{\mu_w} \times \sum R \Delta h_w + \frac{K_{zo}}{\mu_o A_o} \sum R \Delta h_o \\
 & \frac{\beta_o}{\mu_w} \times \frac{K_{zw}}{K_{zo}} \beta_o \times \sum R \Delta h_w \\
 & \frac{\beta_o}{\mu_w} \times \frac{K_{zw}}{K_{zo}} \beta_o \times \sum R \Delta h_w + \sum R \Delta h_o \\
 \hline
 & \frac{M A_o \times \sum R \Delta h_w}{M \beta_o \times \sum R \Delta h_w + \sum R \Delta h_o} = \frac{A \times \sum R \Delta h_w}{A \times \sum R \Delta h_w + \sum R \Delta h_o}
 \end{aligned}$$

Finalmente la expresión : $\sum R \Delta h_w$ representa la capacidad pie-milidarcy para la producción de agua: c_F y $\sum R \Delta h_o$ representa : $(c_T - c_F)$. Entonces, la expresión anterior se convierte en:

$$\frac{F_w}{F_o} = \frac{A c_F}{A c_F + (c_T - c_F)} \quad \text{-----} \quad (2)$$

FRACCION DE PRODUCCION DE AGUA EN EL RESERVORIO

La fracción de producción de agua en el reservorio (reservoir water cut); viene definido por la expresión:

$$f_w = \frac{Q_w}{Q_w + Q_o}$$

Aplicando la ley de Darcy; se tiene:

$$f_w = \frac{\frac{K_{rw}}{\mu_w} \times \sum K \Delta h_w}{\frac{K_{rw}}{\mu_w} \times \sum K \Delta h_w + \frac{K_{ro}}{\mu_o} \times \sum K \Delta h_o}$$

$$\frac{\left(\frac{\mu_o}{\mu_w} \times \frac{K_{rw}}{K_{ro}} \right) (c_T)}$$

$$\frac{\left(\frac{\mu_o}{\mu_w} \times \frac{K_{rw}}{K_{ro}} \right) (c_T) + (c_T - c_P)}{}$$

Finalmente:

$$f_w = \frac{N c_T}{N c_T + (c_T - c_P)} \quad (3)$$

CAPITULO II

CARACTERISTICAS GENERALES DEL RESERVOIRIO "X"

El reservorio problema "X", es una formación compuesta de 27 estratos de distintos espesores y distintas permeabilidades absolutas conforme al siguiente cuadro:

NUMERO DE CAPAS	ESPESOR Δ h, pies	PERMEABILIDAD K, md.
1	1	776
2	1	454
3	1	349
4	1	308
5	1	295
6	1	282
7	1	273
8	1	262
9	1	228
10	1	187
11	1	178
12	1	161
13	1	159
14	1	148
15	1	127
16	1	109
17	1	88
18	2	87
19	1	77
20	1	71
21	1	62
22	1	58
23	1	56
24	1	50
25	2	47
26	1	35
27	1	16

POROSIDAD

Esta característica de roca es una expresión volumétrica que relaciona en forma de porcentajes, la razón de volumen poroso conectado, al volumen bruto. Representa la capacidad de almacenamiento de la roca y se lo expresa -

FORMULA:

$$P = \frac{\text{Vol. poroso conectado}}{\text{Vol. total}} \times 100$$

Se va a considerar que todos los estratos tienen una porosidad de 19% y el total de espacio poroso va a estar referido a un volumen de 100 pie-acres de formación.

SATURACION DE AGUA INTERSTICIAL

Es la cantidad de agua dentro del reservorio que ocupa un espacio poroso, pero que no fluye al pozo. Este valor tiene una gran importancia ya que permite calcular el espacio poroso neto capaz de contener gas y petróleo dentro de un reservorio. La saturación de agua intersticial para el reservorio estratificado "X" será considerado de 24%.

SATURACION DE ACEITE

Se define como la razón entre volumen de aceite en el reservorio y el volumen total de espacio poroso. Esta saturación de aceite, sin embargo, no es una indicación -

de la reserva total de petróleo. En todos los casos se debe considerar una saturación residual de aceite. En el reservorio "X" se tiene pues una saturación inicial de aceite de $100 - 24$, es decir de 76% y se acepta una saturación residual de 23%.

PERMEABILIDADES RELATIVAS

Los datos de permeabilidad del cuadro anterior se refieren a las permeabilidades absolutas de cada estrato. Esta permeabilidad corresponde a una formación 100% saturada con un sólo fluido; pero si se tiene dos fluidos con saturaciones definidas en la misma formación, es necesario considerar las permeabilidades efectivas correspondientes a cada fluido. Consecuentemente, la permeabilidad efectiva es la permeabilidad de una roca para un fluido particular cuando dicho fluido tiene una saturación menor del 100%.

Por otra parte, cuando dos fluidos están presentes tales como el aceite y el agua, el régimen de flujo de los dos fluidos es determinado por las permeabilidades relativas. Permeabilidad relativa es la razón de la permeabilidad efectiva a la permeabilidad absoluta. Una de las asunciones del método de Stiles es precisamente considerar constante las permeabilidades relativas al aceite y al agua. La permeabilidad relativa al aceite será de 0.80 y al agua de 0.20.

Se puede ver fácilmente, que la razón de las permeabilidades relativas es igual a la razón de las permeabilidades efectivas y además la relación $0.8/0.2$ es igual a la relación $80/20$. Esta aclaración se hace necesaria, debido a que en los datos para la computadora se va a usar los valores de 80 y 20 como permeabilidades relativas al aceite y al agua respectivamente, y el valor de la razón de las permeabilidades efectivas es 4.

FACTOR DE VOLUMEN DE FORMACION

Debido a la solución del gas en el aceite; el volumen de espacio poroso ocupado por la mezcla gas-aceite a las condiciones del reservorio, es mayor que el volumen neto de petróleo en la superficie obtenido de la mezcla. El factor de volumen de formación expresa pues la relación del volumen de mezcla en el reservorio al volumen de petróleo en la superficie, para la unidad de mezcla. Para el reservorio "X" se considera un factor de volumen inicial de 1.215 barriles de espacio reservorio/barril de petróleo en la superficie.

VISCOSIDADES

La viscosidad del aceite se asume un valor de 4.34 cp. y del agua 0.82 cp. La relación de viscosidades tiene pues un valor de 5.3

EVALUACION DEL ACEITE INICIAL IN SITU

Originalmente este reservorio "X" tuvo una producción primaria por el mecanismo de gas en solución y el factor de volumen cambió de 1.215 a 1.073. El aceite inicial in situ se puede estimar con los datos anteriores usando la expresión:

$$N = \frac{7758.4 \times FTACR \times \beta \times (1 - S_{wi})}{A_1}$$

$$= \frac{7758.4 \times 100 \times 0.19 \times (1 - 0.24)}{1.215} = 92,200 \text{ STB}$$

La recuperación primaria, aplicando el criterio de Balance de Materiales es entonces:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{A_1 - A_0}{A_1} = \frac{1.215 - 1.073}{1.215} = 0.116 = 11.6\%$$

SATURACION DE ACEITE DESPUES DE LA RECUPERACION PRIMARIA

Esta saturación representa una saturación inicial para la recuperación secundaria y se calcula por medio de la expresión:

$$S_0 = \left(1 - \frac{\Delta N}{N}\right) (1 - S_{wi}) \left(\frac{A_0}{A_1}\right) = (1 - 0.116) (1 - 0.24) \left(\frac{1.073}{1.215}\right) = 0.59$$

Considerando que la saturación residual de aceite es 23%; el aceite recuperable por una completa inundación de los 100 pies-anos de reservorio es

$$N^* = \frac{7758.4 \times 100 \times 0.19 \times (0.59 - 0.23)}{1.073} = 49,500 \text{ STB}$$

REGIMEN DE INYECCION Y EFICIENCIA DE BARRIDO

El regimen de inyección es anima de 100 bbls/día. Para la eficiencia de barrido, la experiencia ha demostrado que con el sistema "Five Spot", dicha eficiencia es solamente 70 ó 90% en la geometría lineal. Esta eficiencia de barrido es definido como la relación del volumen barrido en cualquier tiempo, al volumen total sujeto a la inyección. Luego, la recuperación esperada por el desplazamiento del agua considerando un 85% de eficiencia de barrido es:

$$\Delta N = 0.85 \times N^* = 0.85 \times 49,500 = 42,038 \text{ STB}$$

Esta recuperación secundaria representa el 45.7% - con relación al aceite inicial in situ, es decir, cuatro veces la recuperación primaria.

Entonces la recuperación total es de: $11.6 + 45.7 = 57.3\%$; correspondiente a las recuperaciones primaria y secundaria.

ooooooooo

CAPITULO III

SOLUCION ANALITICA DE LOS CALCULOS QUE REALIZABA LA COMPUTADORA

Los cálculos que realizará la computadora son los siguientes:

1).- TIEMPO DE LIENADO O FILL UP TIME.-

Este tiempo es calculado considerando las saturaciones inicial y residual del aceite durante la inyección del agua. Como el regimen de inyección es de 100 bbls/día, el tiempo de llenado será:

$$t = \frac{7758.4 \times 100 \times 0.19 \times (1-0.59-0.23)}{100} = 250 \text{ días}$$

el volumen de llenado será pues: $250 \times 100 = 25,000$ bbls.

2).- ACEITE RECUPERABLE.-

En el Capítulo anterior se determinó el aceite recuperable, considerando una eficiencia de barrido de 85%. Esta recuperación fué de: 42,038 STB.

3).- RECUPERACION FRACCIONAL.-

Si se considera unidades las 15 primeras capas, la recuperación fraccional hasta la capa 15, de acuerdo a la ecuación (1), será :

$$R = \frac{h_T K_{15} + (c_T - c_F)}{h_T K_{15}} = \frac{15 \times 127 + (5075 - 4187)}{29 \times 127} = 0.758$$

La capacidad total de la formación y las capacidades acumulativas hasta un determinado espesor inundado se obtiene siguiendo la secuencia del siguiente cuadro:

Nº de capas	Δ h: pies	K: md.	$\sum K \Delta h$
1	1	776	776
2	1	454	1230
3	1	349	1579
4	1	308	1887
...
...
15	1	127	4187
...
...
27	1	16	5075

La capacidad total de la formación es pues: 5075 pie-md.

4).- FRACCION DE PRODUCCION DE AGUA EN LA SUPERFICIE.-

Este cálculo se realiza por medio de la ecuación (2) y para ello se determina previamente el valor de Δ :

$$\Delta = \frac{\beta_0}{\beta_w} \times \frac{K_{zw}}{K_{zo}} \times \beta_0 = \frac{4.34}{0.82} \times \frac{0.8}{0.2} \times 1.073 = 1.42$$

Entonces el valor f_w^i cuando la inundación incluye la ca

pa 15 será:

$$\xi_V^i = \frac{1.42 \times 4187}{1.42 \times 4187 + (5075 - 4187)} = 0.87$$

5).- PRODUCCION DE ACEITE ACUMULATIVO.-

Si se tiene la recuperación fraccional al final de cada estrato inundado; la producción de aceite acumulativo - en cualquier tiempo será el producto de la recuperación fraccional por la cantidad de aceite recuperable. Así - por ejemplo, la producción de aceite acumulativo después de ser inundado los 15 primeros cupos es de:

$$\Delta N_c = R \times 42,038 = 0.758 \times 42,038 = 31,879$$

6).- INCREMENTO DE ACEITE RECUPERADO POR ESTRATO.-

Si se tiene la producción acumulativa de aceite sucesivamente en los estratos; el aceite recuperado de cada uno de ellos se obtiene por simple resta.

7).- REGIMEN DE PRODUCCION DE CADA ESTRATO.-

Para determinar el régimen de producción esperado de cada estrato, se debe conocer previamente la fracción de producción de agua en el reservorio; la misma que se sabe, viene dada por la expresión:

$$\xi_V = \frac{M \alpha_f}{M \alpha_f + (\alpha_T - \alpha_f)}$$

Para el primer estrato, es decir, para el estrato que tiene la mayor permeabilidad, no existe ningún estrato previo totalmente inundado y consecuentemente el valor de c_p es cero. Luego, la fracción de producción de agua en el reservorio para el primer estrato es cero.

Las demás fracciones de producción de agua en el reservorio para los demás estratos se calcula de acuerdo a la ecuación anterior, donde el radio de movilidad es:

$$M = \frac{\mu_o}{\mu_w} \times \frac{K_{ro}}{K_{rw}} = \frac{4.34}{0.82} \times \frac{0.8}{0.2} = 1.32$$

Luego, la fracción de producción de agua en el reservorio para el segundo estrato es:

$$z_w = \frac{1.32 \times 776}{1.32 \times 776 + (5075-776)} = 0.192$$

Una vez determinada la fracción de agua en el reservorio la diferencia $(1 - z_w)$ representa la fracción de aceite en el reservorio y como se está inyectando agua a un régimen de 100 bbl/día, el régimen de aceite en el reservorio será: $100 (1 - z_w)$. Finalmente, el régimen de producción de petróleo en la superficie será:

$$q_o = \frac{100 (1 - z_w)}{A_o}$$

Para el primer estrato donde $q_v = 0$ la fórmula se convierte en:

$$q_0 = \frac{100}{A_0} = \frac{100}{1.073} = 93.1 \text{ STO/día}$$

Para el segundo estrato será:

$$q_0 = \frac{100 (1 - 0.192)}{1.073} = 75.2 \text{ STO/día}$$

8).- TIEMPO TOTAL DE INYECCIÓN.-

Cuando se ha obtenido la producción de cada estrato y su régimen de producción, es fácil calcular el tiempo de desplazamiento en cada estrato. Así por ejemplo, para el primer estrato el tiempo de desplazamiento para producir 9480 STO es:

$$\Delta t = \frac{9480}{93.1} = 102 \text{ días}$$

Considerando los 250 días de llenado, el tiempo total será:

$$T = 250 + 102 = 352 \text{ días}$$

Para el segundo estrato se tiene:

$$\Delta t = \frac{5695}{75.2} = 76 \text{ días}$$

Luego, el tiempo total transcurrido hasta la producción to-

del del siguiente contrato es: $T = 352 + 76 = 428$ días.

99.- VOLUMEN DE AGUA INYECTADA.-

Como el régimen de inyección es de 100 mbls/día y se tiene el número de días de desplazamiento, el total de barriles de agua inyectada será:

$$VI = T \times 100$$

Para la producción del primer contrato se habrá inyectado:

$$VI = 352 \times 100 = 35,232 \text{ Mils.}$$

Cuando el agua haya desplazado todo el aceite de la formación se habrá inyectado un total de:

$$VI = 6132 \times 100 = 613,272 \text{ Mils.}$$

En realidad, el número de días considerando la parte de agua es de 6132.72; pero el programa ha sido hecho para tener únicamente la parte entera en la terminación de los tiempos.

100.- RELACION AGUA-ACEITE ACUMULATIVAS.-

Esta relación es expresada por la siguiente fórmula:

$$WOR_c = \frac{\text{Agua total inyectada}}{\text{Aceite total producido}}$$

Así por ejemplo, para el primer contrato se tiene:

$$WOR_c = \frac{35,232}{9480} = 3.71$$

11).- RELACION AGUA-ACEITE PARA CADA ESTRATO.-

Esta relación viene definida por la expresión:

$$FWOR = \frac{\text{Regimen de inyección de agua}}{\text{Regimen de producción de aceite}}$$

Para el primer estrato se tiene entonces:

$$FWOR = \frac{100}{93.1} = 1.07$$

CAPITULO IV

PROGRAMA FORTRAN

El nombre de Fortran, proviene de las raíces inglesas Formula Translation que en castellano podría traducirse en forma apropiada por la expresión TRANSCRIPCIÓN DE FÓRMULAS. Pero debido a que la terminología inglesa es ahora tan popular en los lugares dedicados al uso y manejo de éstas máquinas resulta prácticamente necesario conservarla e incluso sus programas están elaborados para recibir instrucciones en inglés, como se verá en el contenido de la Tesis.

Por otra parte, el lenguaje básico de la computadora consiste en instrucciones elementales tales como suma, resta. Entonces el procedimiento para resolver un problema de será transcribirse en instrucciones sencillas que la computadora sea capaz de obedecer; estas transcripciones, llamadas Codificaciones se realiza con la misma ayuda de la computadora mediante el uso de un compilador, es decir de un FORTRAN.

Un compilador o Fortran, produce entonces las instrucciones elementales propias de la máquina, es decir, un lenguaje de máquinas que ha de resolver el problema que inicialmente está en lenguaje Fortran. Este Fortran, administra -

los elementos para cinco operaciones básicas que son: suma, resta, multiplicación, división y potencia. Cada una de estas operaciones se representa con un símbolo diferente:

Suma ----- (+)

Resta ----- (-)

Multiplicación ----- (*)

División --- (/)

Potencia --- (**)

PROCEDIMIENTO.-

El procedimiento a seguir para la solución de problemas con el uso del lenguaje Fortran, está especificado por una serie de proposiciones o sentencias de diferentes tipos:

- a).- Proposiciones que especifican las operaciones aritméticas que constituyen la esencia del procedimiento.
- b).- Proposiciones que especifican el suministro y la salida de informaciones; tales como la lectura de una tarjeta de datos, la impresión de los resultados ó la perforación de una tarjeta con las soluciones.
- c).- Proposiciones que especifican el control de flujo a través del conjunto de proposiciones, es decir, la secuencia en que éstas deben ejecutarse.
- d).- Proposiciones que suministran cierta información acerca del procedimiento; sin que por ello originen acción alguna.

Todas estas proposiciones tomadas conjuntamente es lo que constituye el PROGRAMA FUENTE.

Este Programa Fuente, previamente se prepara en un formulario llamado formato IBM para Codificación Fortran. En este formulario van todas las proposiciones Fortran cuidadosamente ubicadas en su espacio respectivo, en tal forma que se tenga un máximo de 72 columnas. Cualquier exceso de las 72 columnas no tomará en cuenta la computadora.

Seguidamente, el Programa Fuente se escribe y perfora en tarjetas; para transcribirlo a un Programa Objeto por medio del Fortran.

El PROGRAMA OBJETO constituye pues un grupo de tarjetas perforadas en lenguaje de máquina.

En la página siguiente se tiene el listado del Programa Fuente.

OBTENCION DEL PROGRAMA OBJETO.-

Una vez que se tiene el Programa Fuente escrito y perforado en tarjetas, es necesario hacer previamente un chequeo con el objeto de averiguar si existen o no errores en el Programa. Para ello se hace uso del Precompilador. Este Precompilador es un grupo de tarjetas perforadas hecho por IBM y que sirven para detectar errores; los mismos que se obtienen en clave por medio de la máquina de escribir.

```

METHODO DE STILES PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DE UN RESERVOIRIO
ESTRATIFICADO QUE PRODUCE POR INFLUJO DE AGUA
READ 10, ITEMS, VISO, VISW, PERMO, PERMW, SOI, SOF, SWI, POR, ACFT, QWI, CA, BO
FORMAT (I3, 2F7.2, 2F5.0, 4F5.3, F8.0, F5.0, F5.3, F5.3)
OIP=ACFT*7758.4*(SOI-SOF)*POR/BO*CA
A=(VISO*PERMW*BO)/(VISW*PERMO)
DIMENSION DELH(100), PERM(100), C(100), H(100)
DO 15 I=1, ITEMS
READ 20, DELH(I), PERM(I)
FORMAT (F4.1, F5.0)
FUT=(1.0-SWI-SOI)*ACFT*7758.4/QWI*POR
TIEMPO DE LLENADO EN DIAS
IF (SENSE SWITCH 3) 110, 120
PRINT 70, FUT, OIP
PRINT 80
PRINT 90
GO TO 24
PUNCH 70, FUT, OIP
FORMAT(12HFILLUP TIME=, F5.0, 4HDAYS, 8X12HRECOVER OIL=, F7.0, 4H STO)
PUNCH 80
FORMAT(5H DELH, 9X1HR, 11X5HCUMOP, 13X3HOSC, 14X2HWI, 14X4HPWOR)
PUNCH 90
FORMAT(7X4HPERM, 8X2HFW, 14X5HDELOP, 10X4HTIME, 12X6HCUMWOR, 11X4HFPRW)
H(1)=DELH(1)
C(1)=DELH(1)*PERM(1)
DO 30 I=2, ITEMS
C(I)=C(I-1)+DELH(I)*PERM(I)
H(I)=H(I-1)+DELH(I)
CUMOL=0.0
TIME=FU
DO 55 I=1, ITEMS
R=(H(I)*PERM(I)+C(ITEMS)-C(I))/(H(ITEMS)*PERM(I))
FW=A*C(I)/(A*C(I)+C(ITEMS)-C(I))
CUMOP = R*OIP
DELOP = CUMOP-CUMOL
CUMOL = CUMOP
IF(I-1) 33, 33, 34
FPRW = 0.0
GO TO 35
FPRW=(A/BO)*C(I-1)/((A/BO)*C(I-1)+(C(ITEMS)-C(I-1)))
QSC = QWI*(1.0-FPRW)/BO
DELT = DELOP/QSC
TIME = TIME + DELT
WI=QWI*TIME
CWOR = WI/CUMOP
PWOR = QWI * DELT/DELOP
IF (SENSE SWITCH 3) 45, 50
PRINT 60, DELH(I), PERM(I), R, FW, CUMOP, DELOP, QSC, TIME, WI, CWOR, PWOR,
FPRW
GO TO 55
PUNCH 60, DELH(I), PERM(I), R, FW, CUMOP, DELOP, QSC, TIME, WI, CWOR, PWOR
FORMAT(F5.1, F6.0, 2F6.3, F10.0, F8.0, F7.1, F7.0, F11.0, F6.2, F8.2, F5.3)
CONTINUE
GO TO 5
END

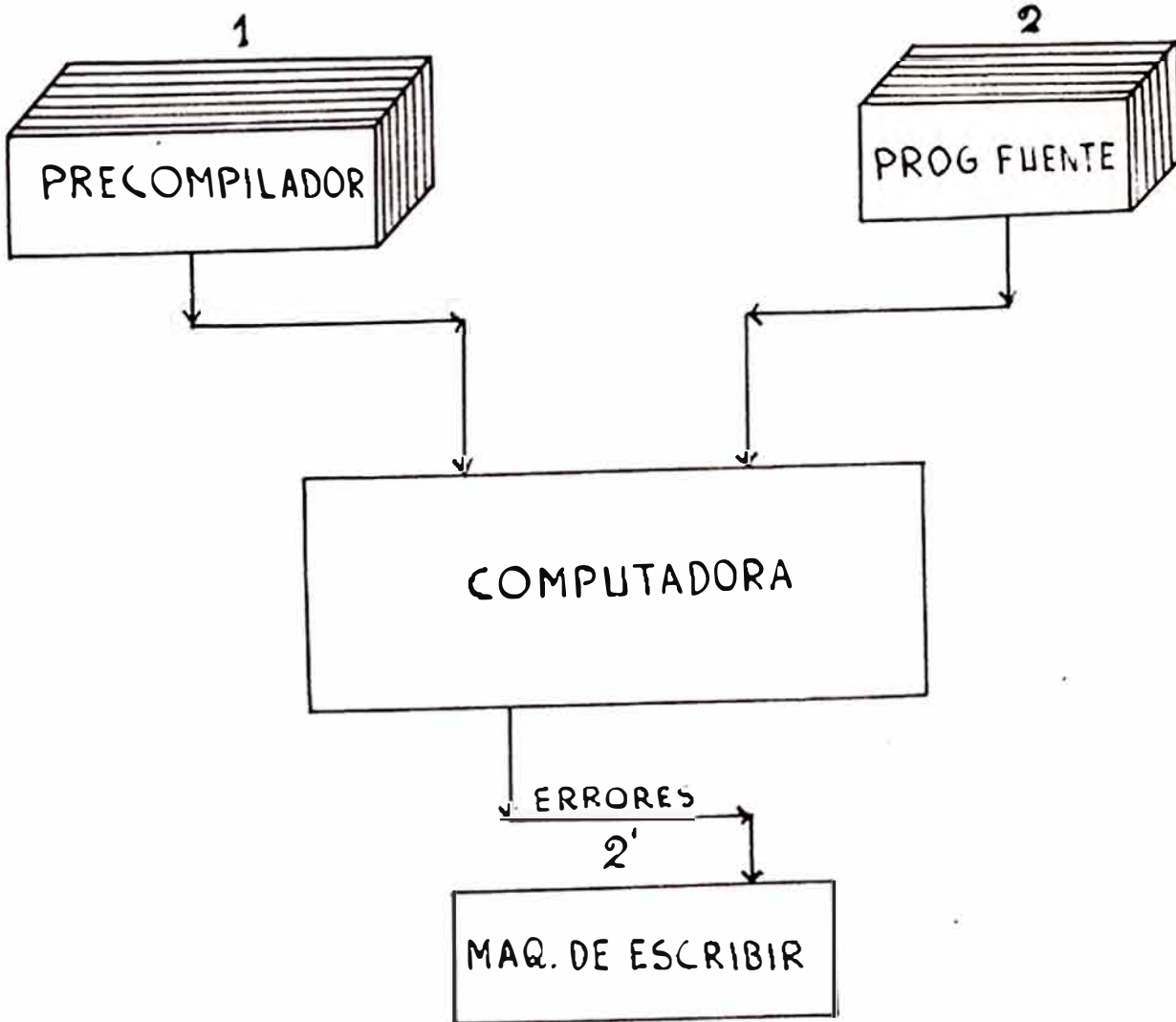
```

La entrada del Precompilador a la computadora se realiza con todos los switches de consola a STOP excepto el switch de OVER FLOW. Existen también dos pares de switches de Programa que pueden tener distintas posiciones según la forma que se desea utilizar, es decir, se puede configurar las posiciones de estos switches para que la computadora encuentre errores y se pare, para que encuentre errores y siga trabajando, para que liste o no el programa. La posición de estos switches están especificados en el Catálogo respectivo. Seguidamente se pasa al Programa Fuente y los errores se van obteniendo en clave por medio de la máquina de escribir. En la siguiente página se tiene un diagrama esquematizado para la obtención de los errores.

Cuando el Programa Fuente está perfectamente chequeado - es decir corregido todos los errores que podrían haber existido, se procede inmediatamente a la codificación por medio del FORTRAN II, que no es otra cosa que un compilador más potente que el FORTRAN con formato. Este último por ejemplo no acepta un campo escrito en la forma 4F5.3 y tampoco acepta la subrutina a la hora de compilar; sí no a la hora de ejecutar.

Para realizar la Codificación primeramente se pasa en la computadora el FORTRAN PASS I teniendo en cuenta la posición de los switches según la forma en que se va a trabajar. Luego se pasa el Programa Fuente y se va obteniendo simultáneamente

FIGURA 2



mience a realizar los cálculos. En la siguiente página se tiene un diagrama esquematizado de la forma como se obtiene el conjunto del Programa Objeto y su Subrutina.

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SECUENCIA DE OPERACIONES QUE REALIZA LA COMPUTADORA.-

El diagrama de flujo permite al programador planear la secuencia de las operaciones dentro de un programa previo a su escritura. Permite tener una representación visual de lo que se va a obtener.

Un diagrama de flujo está constituido por un conjunto de figuras, la forma de las cuales indica la naturaleza de la operación de cálculo descrita en el interior de ellas; conjuntamente con líneas y flechas que muestran el flujo del control entre las diferentes operaciones. A continuación se muestra el diagrama de flujo correspondiente.

ANÁLISIS DE LAS SENTENCIAS FORTRAN UTILIZADAS.-

El grupo de proposiciones Fortran que constituye el Programa Fuente se tiene ya en el listado correspondiente y en el grupo de tarjetas perforadas y escritas.

En el formato de Codificación Fortran el primer campo compuesto por las cinco primeras columnas contienen el número de la proposición, si es que hay alguno. La columna 1 tiene de más la otra función que es la de indicar una tarjeta de información u observación. Entonces, si la columna 1 contie-

FIGURA 3

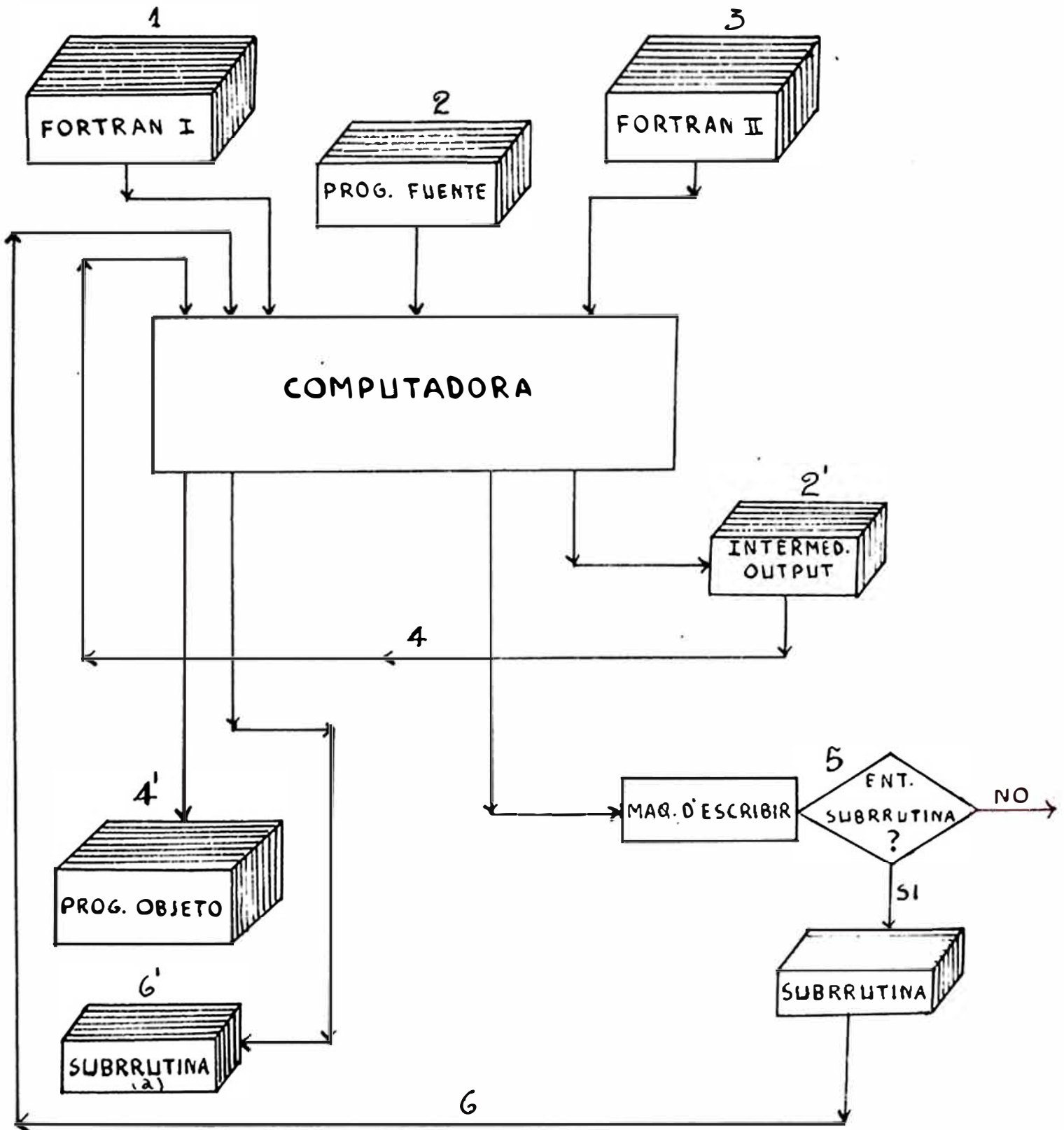
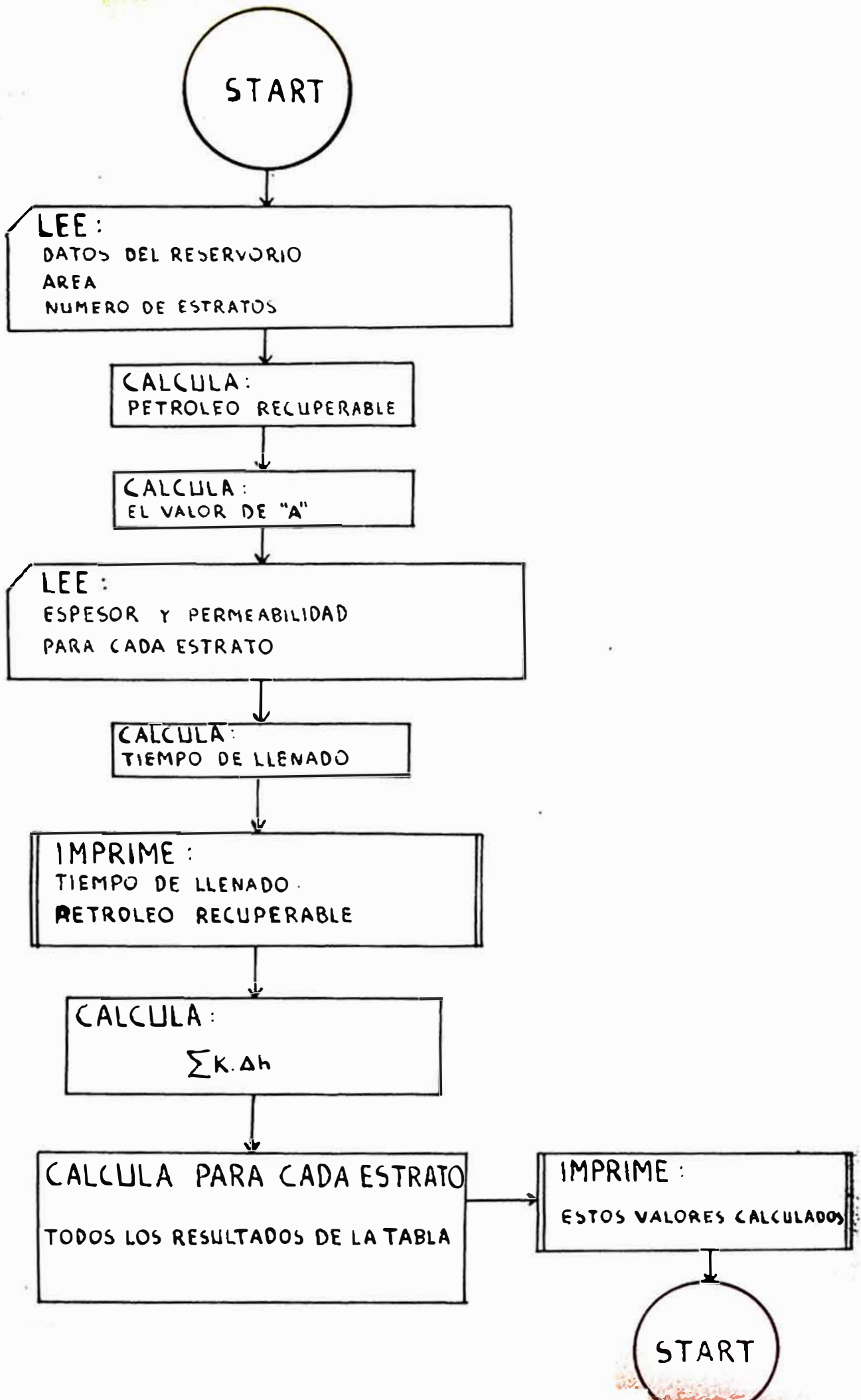


DIAGRAMA DE FLUJO



de una letra "C" la proposición no es procesable y únicamente indica un comentario o título.

La columna 6 se utiliza para indicar una tarjeta de continuación. La primera tarjeta de una proposición continuada deberá tener un cero ó un espacio en blanco en la columna 6 y numerar consecutivamente las demás tarjetas empezando con el número 1.

La proposición propiamente dicha se paraba en las columnas de la número 7 a la 72.

Las columnas de la 73 a la 80 no son procesadas por el FORTRAN y puede utilizarse para cualquier información que se desee o para identificación de programas.

PROPOSICIONES FORTRAN.-

Las dos primeras sentencias constituyen únicamente un título del programa y no es procesable.

La proposición 5 es una proposición de lectura y los datos entran a la computadora por la ejecución de la proposición READ. Las variables del programa, a las cuales se los deberá asignar nuevos valores está especificado por el orden en que aparecen sus nombres en la proposición READ.

¿No existe otro punto más que requiere información:
¿en qué forma se van a leer los datos de la sentencia 5?,
¿cuántas columnas se asignan a cada valor?, ¿es éste valor -

de punto fijo o flotante, ¿debe suprimirse la localización del punto decimal?. Toda esta información se suministra mediante la proposición de FORMAT. En la proposición 5 a READ 10; el número 10 es el número de la proposición del FORMAT.

Consecuentemente, los datos de la sentencia 5 deben ser leídos con el formato de la proposición 10 de acuerdo a una correspondencia rigurosa y en la siguiente forma:

VARIABLES	IDENTIFICACION	FORMATO	COLUMNAS
ITERIS	Número de estratos	I3	+XXX
VISO	Viscosidad del aceite	F7.2	+XXXX.XX
VISA	Viscosidad del agua	F7.2	+XXXX.XX
PERAO	Perm.relative al aceite	F3.3	+XXX.
PERWA	Perm.relative al agua	F3.3	+XXX.
SOI	Saturación aceite inicial.	F3.3	+XXX
SOF	Sat.aceite final.	F3.3	+XXX
SAI	Sat.agua intersticial.	F3.3	+XXX
POR	Porosidad	F3.3	+XXX
ACFT	Volumen pla-areas	F8.3	+XXXXXX.
QWZ	Regimen de inyección de agua	F6.3	+XXXX.
CA	Eficiencia de barrido	F3.3	+XXX
BO	Factor de volumen de extracción	F6.3	+X.XXX

La sentencia 12, es la expresión Fortran para calcular el aceite in situ recuperable en STO; considerando la eficiencia de barrido del desplazamiento del agua y en base a los datos leídos. El cálculo algebraico de esta expresión se ha obtenido en el Capítulo II.

La sentencia 13, es la expresión Fortran para calcular la constante "A".

La siguiente sentencia: DIMENSION, es para indicar - cuántos elementos existen en cada arreglo y separar zonas determinadas en la computadora. Esto significa que se puede tener un máximo de 100 estratos. Esta sentencia no es procesable o ejecutable; solamente otorga información al procesador del FORTRAN.

La proposición: DO 15 I = 1, NEMB; hace posible que se pueda llevar a cabo repetidas veces una misma parte del programa; cambiando entre repeticiones el valor de una variable de punto fijo. La proposición DO se puede escribir en cualquiera de las dos siguientes formas:

$$DO n i = m_1, m_2$$

$$DO n i = m_1, m_2, m_3$$

En donde n deberá representar un número de proposición, i deberá ser una variable de punto fijo sin subíndice, escrita sin signo y m_1 , m_2 y m_3 deberán ser cada una de ellas una -

constante de punto fijo sin signo ó una variable de punto fijo sin signo. Si n_2 no se escribe tal como se tiene en la primera forma, se entenderá que es igual a 1. La proposición que sigue al DO hasta la proposición con el número n inclusive, se ejecutará repetidamente haciéndolo primeramente con $i = n_2$ é incrementándose en n_2 . Las ejecuciones repetidas continúan hasta que las proposiciones hayan sido ejecutadas en un máximo de $i = n_2$.

Para la sentencia de DO, en el programa; las ejecuciones repetidas se refieren a la proposición 15 con formato 20; desde $I = 1$ hasta $I = IEND$ es decir hasta completar el número de estratos y con un incremento de 1 en 1 (ya que no se establece n_2). La proposición 15 sirve pues para leer todos los espesores y permeabilidades de cada estrato en la siguiente forma:

VARIABLE	IDENTIFICACION	FORMATO	COLIFRAS
DELI (I)	Espesor de cada estrato	F4.1	+X.X
PERM (I)	Permeab. de cada estrato	F5.2	+XX.

La computadora leerá pues: DELI (1), DELI (2), DELI (3) etc.; PERM (1), PERM (2), PERM (3) etc. de acuerdo al formato de la proposición 20 y en virtud de la proposición DO.

En la siguiente sentencia se calcula el tiempo de flujo

do ó fill up time. La expresión Fortran para ello está indicado en el listado del programa fuente.

La siguiente proposición es un comentario; para indicar que el tiempo de llamado está en días. No es procesable y en la columna ¿ existe la letra "C".

La siguiente sentencia de IF, es para desviar el programa. Considera la posición del switch 3 para el caso en que esté en ON ó OFF. Si está en ON debe ir a la proposición 119 para imprimir (PRINT) y si está en OFF debe ir a la proposición 120 para perforar (PUNCH). La sentencia es:

IF (SENSE SWITCH 3) 119 , 120

En la proposición 119 aparece efectivamente la instrucción de PRINT, con el formato 70, es decir para imprimir los valores ya calculados: Tiempo de llamado y aceite recuperable.

Las dos sentencias siguientes son también instrucciones para imprimir con formatos 80 y 90 los mensajes ó títulos de la solución del programa que va a entregar la computadora.

Una vez ^{50:} imprimido los títulos, la siguiente sentencia es una proposición de transigencia: 60 TO 24, para indicar que la computadora vaya a la sentencia 24 y ejecute todas las sentencias posteriores incluyendo la 24.

La siguiente proposición, que es la 120 es la otra par-

te del IV, para el caso en que la posición del switch 3 sea OFF y es para perforar en tarjetas los valores calculados : tiempo de llenado y aceite recuperable.

En la proposición 70 se indica el formato para imprimir el tiempo de llenado y el aceite recuperable, incluyendo además los títulos o mensajes respectivos. Los campos H se utilizan en formatos precisamente para declarar mensajes. Así por ejemplo "12H" indica lugar para poner un mensaje máximo de 12 letras siendo el fin del campo por medio de una (,) Como ejemplo tenemos la expresión de mensaje: FILLUP TIME = , . los campos X se usan para dejar espacios libres. Los dos valores calculados son pues imprimidos en la siguiente forma:

VARIABLE	IDENTIFICACION	FORMATO	COLUMNAS
FUF	Tiempo de llenado	F5.2	+100.
OIP	Acite recuperable	F7.2	+XXXXX.

La siguiente sentencia es una proposición para perforar en la proposición 80 en el caso de que la computadora esté operando con la posición del switch 3 en OFF.

La sentencia 80 es efectivamente el formato para imprimir o perforar los títulos de la solución del programa, es decir, para declarar mensajes utilizando los campos H y ordenar

la tabulación utilizando los campos "X". Estos campos "X" indican, como ya se dijo, espacios libres. Así por ejemplo, la expresión:

1HR, 11XSHCUMOP

indica que entre los títulos R y CUMOP hay un total de espacios libres equivalente a 11 letras. Nótese que para declarar el mensaje R se ha utilizado 1H y para declarar el mensaje CUMOP se ha utilizado 5H. En esta sentencia 80, se imprime pues todos los títulos correspondientes a:

DSIH Espesor de cada estrato
R Recuperación fraccional
CUMOP Producción petróleo acumulativo
QSC Régimen de producción de cada estrato
WI Total de agua inyectada
ROR Relación agua-petróleo de cada estrato.

La siguiente proposición es también para indicar el formato en el caso de que se esté perforando los resultados del programa.

La sentencia 90 es el formato ya sea para imprimir o perforar los mensajes correspondientes a:

PERN Permeabilidad de cada estrato

- FW** Fracción de producción de agua en la superficie.
- DELOP** Incremento de aceite recuperado de cada estrato.
- TUE** Tiempo total de inyección.
- CUMDR** Relación agua-petróleo acumulativo.
- FRW** Fracción de producción de agua en el reservorio.

Para esto, se ha utilizado igualmente los campos H y los campos X.

Antes de iniciar el análisis de la sentencia 24, es necesario hacer ciertas aclaraciones. Para el problema se va a considerar Δ h como espesor de un estrato y h como el espesor total de un grupo de estratos. Además, el símbolo de la capacidad pie-dá será C. Entonces, en la sentencia 24 se ha $ce; H(1) = DELE(1)$; lo que significa algebraicamente que para el primer estrato se tiene $h_1 = \Delta h_1$.

En la sentencia 25 se calcula la capacidad del primer estrato por medio de la expresión Fortran:

$$DELE(1)*FRW(1)$$

La siguiente sentencia es un DO; con el objeto de calcular todas las capacidades acumulativas y espesores totales de los estratos a partir del estrato número 2 hasta completar el número total de estratos y con incrementos de uno en uno.

El rango del DO comprende hasta la sentencia 30 inclusive y la expresión Fortran es:

DO 30 I = 2, ITEMS

La capacidad acumulativa hasta un estrato determinado se calcula por medio de la expresión Fortran:

$$C(I) = C(I-1) + DELH(I)*PERM(I) \dots\dots\dots(a)$$

Por ejemplo la capacidad acumulativa hasta el estrato 2 incluye (capacidad del primer estrato + capacidad del segundo) - será calculado de la siguiente forma:

$$C(2) = C(1) + DELH(2)*PERM(2) = C(1) + C'(2)$$

Como C(1) se ha calculado previamente y es por ello que el C(2) del primer miembro representa la capacidad total de los dos primeros estratos. Análogamente, de la expresión (a) se tiene:

$$C(3) = C(2) + DELH(3)*PERM(3) = C(1) + C'(2) + C'(3)$$

Es decir se obtiene la capacidad total de los tres primeros estratos. La computadora sigue operando en esa forma hasta obtener la capacidad total de la formación.

La sentencia 30 es para calcular los espesores totales por medio de la expresión Fortran:

$$H(I) = H(I-1) + DELH(I)$$

Por ejemplo el espesor total hasta el estrato 2 será:

$$H(2) = H(1) + DELH(2) - DELH(1) + DELH(2)$$

Ya que en la sentencia 24 se ha hecho $H(1) = DELH(1)$.

Hasta el estrato 3 se tendrá:

$$H(3) = H(2) + DELH(3) - DELH(1) + DELH(1) + DELH(3)$$

Se ve claramente que H representa el espesor total hasta un estrato determinado.

En la sentencia 31 se hace uso de una nueva variable, con el objeto de calcular el incremento de producción del primer estrato en función de la producción acumulativa de petróleo, es decir, se hace:

$$CINCL = g.g$$

Igualmente en la sentencia 32 se hace la variable TIME igual al tiempo de llenado, por medio de la expresión:

$$TIME = PUT$$

La siguiente sentencia es un DO para realizar todos los cálculos correspondientes a cada estrato; los mismos que se describen ya en forma analítica. El rango del DO es hasta la sentencia 55 y los cálculos se realizan desde el estrato 1 hasta el número total de estratos, con incremento de uno en uno. La expresión $H=trm$ es:

$$DO 55 I = 1, NESTS$$

En la siguiente proposición se calcula el valor de la -

recuperación fraccional para cada estrato: R. La expresión Fortran viene definida por la expresión:

$$R = (H(I) * PERM(I) + C(ITEMS) - C(I)) / (H(ITEMS) * PERM(I))$$

Como ya se vió anteriormente H(I) y C(I) representan espesores y capacidades acumulativas ó totales; C(ITEMS) representa la capacidad total de la formación, H(ITEMS) es el espesor total de la formación y PERM(I) es la permeabilidad del estrato en referencia.

En la siguiente expresión se calcula la fracción de producción de agua en la superficie (Surface water cut). La expresión Fortran es la siguiente:

$$FW = A * C(I) / (A * C(I) + C(ITEMS) - C(I))$$

La siguiente proposición es para calcular la producción acumulativa de petróleo por medio de la expresión:

$$CUMDP = R * OIP$$

En la siguiente sentencia se calcula la producción total de cada estrato por medio de la expresión:

$$DELOP = CUMDP - CUMDL$$

Para el primer estrato nótese que se hizo anteriormente fuera del rango del DO: CUMDL = 0.0.

La siguiente sentencia es precisamente para hacer el cambio de la variable correspondiente a CUMDL y poder calcu-

lar el DRIO para los entornos siguientes. El cambio correspondiente es:

CUMUL = CUMOP

Esta última expresión se encuentra dentro del rango del DO.

La siguiente proposición es una sentencia de transferencia condicional: IF de acuerdo al valor que tome una variable. Es decir, esta proposición es necesaria para obtener una transigencia condicional del control, en función de los datos ó resultados calculados. La proposición IF es de la forma:

IF(e)n₁,n₂,n₃

Donde "e" representa cualquier expresión y n₁,n₂ y n₃ son número de proposiciones. La operación de la proposición es como sigue:

Si el valor de la expresión dentro del paréntesis es negativo, la proposición que tenga el número n₁ se ejecutará a continuación, si el valor de la expresión es cero, se ejecutará a continuación la proposición n₂ y, si la expresión es positiva la que se ejecutaría a continuación sería la proposición n₃. La expresión de transigencia condicional que se tiene en el programa es:

IF(L-1) 33, 33, 34

Es importante no olvidar la posibilidad de que la expresión dentro del paréntesis sea negativa, ya que la variable empírica -

del valor 1. Entonces, para el primer estrato la expresión - del paréntesis se hace como y en consecuencia se ejecutará - la proposición 33. Para todos los demás estratos, la canti- dad del paréntesis es positiva y se ejecutará entonces para todos ellos la proposición 34.

En la sentencia 33 se considera la proporción del va- lor de la fracción de producción de agua en el reservorio pa- ra el primer estrato, es decir: $FPRW = g.g.$

La sentencia 34 sirve para calcular la fracción de la producción de agua en el reservorio de los demás estratos , con la siguiente expresión Fortran:

$$FPRW = (A/BO)*C(I-1)/((A/BO)*C(I-1)+(C(ITEMS)-C(I-1)))$$

Después de la sentencia 33, hay una proposición GO TO, que suministra los medios de transferir el control a alguna otra posición que no sea la que le siga en la secuencia. La proposición toma la forma:

GO TO n

en la que n es el número de alguna otra proposición del pro- grama. Cuando existe esta sentencia, la siguiente proposi- ción que se efectúa será la especificada por el número de - la proposición. La sentencia GO TO 35 indica que después de considerar $FPRW = g.g.$ se calculará inmediatamente la expresión que está en la sentencia 35. En el otro caso si la proposi-

cada IF define ir a la sentencia 36, la ejecución de la sentencia 35 es automática de acuerdo a la sentencia.

En la sentencia 35 se tiene el cálculo del régimen de producción de cada estrato dado por la siguiente expresión Fortran:

$$OSC = QWI * (1 - FPH) / DO$$

En la siguiente proposición se calcula el tiempo de producción de cada estrato. La expresión Fortran es:

$$DELT = DELOP / OSC$$

Con el objeto de calcular el total de agua inyectada se debe considerar el tiempo total incluido el tiempo de ligado. Entonces en la siguiente sentencia se hace:

$$TIME = TIME + DELT$$

Si se recuerda que anteriormente se hizo $TIME = PUT$; el $TIME$ del primer momento es el tiempo total incluido el tiempo de ligado.

Seguidamente en la siguiente proposición se tiene la expresión para el cálculo del total de agua inyectada:

$$WI = QWI * TIME$$

Océvase que cuando la computadora realiza el cálculo de esta última expresión para un segundo estrato, $TIME$ representa

rá en realidad:

$$TIE = TIB + IBIA + IBIT$$

y así sucesivamente.

En la siguiente sentencia se calcula la relación agua escrita acumulativa por medio de la siguiente expresión For-
tran:

$$CWR = WI / CWRP$$

La siguiente proposición sirve para calcular la rela-
ción agua escrita de cada entrada por medio de la expresión -
Fortran:

$$FWR = CWR * DEIA / DELOP$$

La siguiente sentencia es para especificar si los re-
sultados van a ser ^{2.2}imprimidos por la máquina de escribir ó
van a ser perforados en tarjetas. Esta decisión esté en fun-
ción de la posición del switch 3; si está en ON ó OFF res-
pectivamente. Para la primera posición irá a la sentencia
45 ó imprimirá con el formato de la proposición 60. Si está
en OFF irá a la posición 50 y perforará los resultados i
guilmente con el formato 60.

En la sentencia 45 se tiene para la proposición para -
imprimir los resultados:

DELE(I), FERN(I), R, FW, CWRP, DELOP, OSC, TIME, WI, CWR, FWR, FFRW

Señálase que la proposición 45 es una proposición confirmada para imprimir el valor de F_{11N} y se tiene una nueva sentencia en la cual se indica con el número 1 colocado en la ~~columna~~ 6 la continuación de la sentencia 45.

Seguida se tiene una proposición que indica:

GO TO 55

Esta expresión se usa para desviar el control a la sentencia 55 donde se tiene la proposición CONTINUE para cerrar el rango del DO.

La sentencia 58 es, como ya se dijo para perforar los mismos resultados.

En la sentencia 60 está el formato, es decir la forma en que van a ser ^{los} ~~impresión~~ o ~~perforados~~ los resultados:

VARIALES	IDENTIFICACION	FORMATO	COLUMNAS
DEIN(I)	Espesor de cada estrato	F5.1	+XX.X
PERN(I)	Perm. de cada estrato	F6.5	+XXXX.
R	Recuperación fraccional	F6.3	+X.XX
FR	Frac.prod. de agua en sup.	F6.3	+X.XX
CUMPR	Prod.acum.de petróleo	F15.5	+XXXXXXXX.
DEIOP	Prod.ac.de pet.de c/ est.	F8.5	+XXXXX.
QSC	Req. de prod.de petróleo	F7.1	+XXXX.X
TDS	Tiempo total de inyección	F7.5	+XXXX.
VI	Total de inyec.de agua	F11.5	+XXXXXXXXXX.
CNR	Salas.agua-pet.acumulativo	F6.2	+X.XX
FRN	Salas.agua-pet.de c/ est.	F8.2	+XXXX.XX
FRNR	Frac.prod.de agua en reserv.	F5.3	+XXX

Para indicar estos formatos, es necesario prever el espacio que se desea tomar en la tabulación y conocer así mismo la magnitud de los resultados; con el objeto de conseguir una exacta tabulación. Estos formatos pueden ser colocados en cualquier parte del programa, pero siempre es preferible seguir una secuencia lógica.

La penúltima sentencia indica una transferencia del control a la proposición 5 para leer nuevos datos si los hay.

La última sentencia es la proposición END que se usa como señal al compilador; para indicarle que ha llegado a su término el programa, es decir, notifica el fin del Programa Fuente e informa al compilador que concluya la producción del Programa Objeto.

.....

CAPITULO V

ENTRADA DE DATOS PARA EL PROGRAMA BASE

Los datos correspondientes al Programa Base comprendo:
datos de reservorio y datos de espesor y permeabilidad de cada estrato.

1).- DATOS DEL RESERVORIO.-

Estos datos son perforados de acuerdo al formato de la sentencia 10 del Programa Base y serán leídos en la computadora cuando se ejecute la sentencia 5. Se tiene por:

IDENTIFICACION	FORMATO	DATO	Nº COLUMNAS
Número de estratos	I3	+27	3
Viscosidad del aceite, cp	F7.2	+004.34	7
Viscosidad del agua, cp	F7.2	+000.82	7
Perm. relativa al aceite	F5.3	+080.	5
Perm. relativa al agua	F5.3	+020.	5
Set. inicial de aceite	F5.3	+.590	5
Set. residual del aceite	F5.3	+.230	5
Set. agua intersticial	F5.3	+.240	5
Porosidad	F5.3	+.190	5
Volumen, pie-acres	F8.3	+000100.	8
Reg. de inyec. agua bh/d	F6.3	+0100.	6
Eficiencia de barrido	F5.3	+.850	5
Factor de vol. del aceite	F6.3	+1.073	6
TOTAL NÚMERO DE COLUMNAS :			72

2).- DATOS DE ESPESOR Y PERMEABILIDAD DE CADA ESTRATO.-

Estos datos son perforados en las tarjetas de acuerdo al formato de la sentencia 20 y son leídos en la computadora cuando se ejecuta la sentencia 15.

Los datos correspondientes a los espesores son perforados con el formato: F4.1. Los que corresponden a las permeabilidades son perforados con el formato F3.0.

Nº DE ESTRATOS	ESPEJOR:PIES	PERMEABILIDAD:PD
1	+1.0	+776.
2	+1.0	+454.
3	+1.0	+349.
4	+1.0	+308.
5	+1.0	+295.
6	+1.0	+282.
7	+1.0	+273.
8	+1.0	+262.
9	+1.0	+228.
10	+1.0	+187.
11	+1.0	+178.
12	+1.0	+161.
13	+1.0	+159.
14	+1.0	+149.
15	+1.0	+127.
16	+1.0	+109.
17	+1.0	+089.
18	+2.0	+087.
19	+1.0	+077.
20	+1.0	+071.
21	+1.0	+062.
22	+1.0	+058.
23	+1.0	+054.
24	+1.0	+050.
25	+2.0	+047.
26	+1.0	+035.
27	+1.0	+016.

Los datos del reservorio son perforados en una sola tarjeta justamente en las 72 columnas.

Para los datos de espesor y permeabilidad de cada estrato, el número de tarjetas es igual al número de estratos y las tarjetas deben ser ordenadas, por conveniencia, en secuencia de permeabilidad decreciente.

Una vez obtenido el Programa Objeto, en realidad es muy fácil obtener las soluciones para cualquier juego de datos o parámetros.

oooooooooooo

CAPITULO VI

ESTUDIO COMPARATIVO DE TODOS LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA COMPUTADORA

Para realizar este estudio se hizo variaciones en la tarjeta correspondiente a los datos del reservorio. Una vez obtenido los resultados con los datos del Programa Base:Tabla I; simplemente se va cambiando la tarjeta de datos del reservorio y se pasa nuevamente todo el conjunto de datos en la computadora, la cual se encargará de imprimir los nuevos resultados.

Las variaciones realizadas en la tarjeta de los datos del reservorio corresponden a:

1).- CAMBIO DE LA PERMEABILIDAD RELATIVA.-

Los cálculos obtenidos con los datos básicos y cuyos resultados se encuentran en la Tabla I; se refieren a permeabilidades relativas de 0.8 y 0.2 correspondientes al aceite y al agua respectivamente. En el cambio se consideró una permeabilidad relativa al aceite de 0.6 y de 0.4 para el agua; obteniéndose las siguientes conclusiones:

a).- En las zonas más permeables se tiene un aumento considerable de la fracción de producción de agua en la cu

partir, debido al aumento de la permeabilidad relativa al agua.

- b).- Existe una gran disminución del régimen de producción de petróleo (GPC); llegándose a obtener una producción de cero barriles del estrato menos permeable. Esta disminución es el resultado de un aumento de la fracción de producción de agua en el reservorio.
- c).- La recuperación fraccional se mantiene constante y consecuentemente la producción acumulativa de petróleo es la misma, no habiéndose alterado las saturaciones.
- d).- Al haber disminuido el régimen de producción de petróleo, esto trae como consecuencia un aumento en el tiempo de inundación total, que se hace más pronunciado en el estrato menos permeable.
- e).- El aumento en el tiempo de inundación trae como consecuencia un aumento en el total de barriles de agua inyectados.
- f).- El menor régimen de producción de petróleo por estrato y el aumento del volumen de agua inyectado hace que igualmente la relación agua-petróleo acumulativos.
- g).- La relación agua-petróleo de cada estrato también aumenta considerablemente; sobre todo en el estrato menos permeable donde el aumento es de 449.97 a 1198.07.
- h).- El tiempo de llenado y el aceite recuperable por injeción de agua, permanecen constantes. Los resultados se encuentran en la TABLA II.

2.- CAMBIO DE LA SATURACION INICIAL DEL ACEITE.-

Para realizar el estudio comparativo se cambio la saturación inicial del aceite de 0.59 a 0.40 y se obtuvo las siguientes conclusiones:

- a).- El tiempo de llenado prácticamente se duplicó, y el aceite recuperable disminuyó de 42,038 a 19,851 STB. Esto indica claramente la importancia capital que tiene la saturación de aceite en un proceso de recuperación secundaria.
- b).- La recuperación fraccional y la fracción de producción de agua en la superficie permanecen constantes.
- c).- ~~Adicionalmente, la producción acumulativa de petróleo disminuye, haciendo solamente un total de 19,851 STB. Esto trae también como consecuencia una disminución en el incremento de producción de cada estrato.~~
- d).- El régimen de producción de cada estrato permanece constante, debido a que no cambia la fracción de producción de agua en el reservorio.
- e).- Prácticamente para los 10 primeros estratos de mayor permeabilidad se tiene un mayor tiempo de inundación total, debido al mayor efecto del incremento del tiempo de llenado. Sin embargo, el tiempo total de inundación de la formación disminuye de 6,632 a 3,544 días.
- f).- El mayor tiempo de inundación hasta los 10 primeros estratos incluye un mayor volumen de inyección de agua

Pero este volumen al final de la inundación total de la formación disminuye de 663,272 á 354,446 bbls.

- g).- Siendo menor la producción de petróleo de cada estrato y teniendo mayores volúmenes de inyección de agua en los primeros estratos; la relación agua-petróleo acumulativo aumenta considerablemente llegando a tener el primer estrato un WOR acumulativo de 12.92.
- h).- La relación agua-petróleo para cada estrato se mantiene constante, debido a que el régimen de inyección de agua y el régimen de producción de cada estrato no han sido alterados.

Los resultados correspondientes se encuentran en la TABLA III.

3.- CAMBIO DE LA SATURACION DE AGUA INTERSTICIAL.-

Para el estudio se cambió la saturación de agua intersticial de 0.24 á 0.20 y se encontró:

- a).- Existiendo un mayor espacio poroso libre, debido a la diminución de la saturación de agua intersticial, el tiempo de llenado aumentó de 250 á 309 días.
- b).- El aceite recuperable por infilzo de agua es la misma, ya que ésta sólo es función de su saturación inicial y residual.
- c).- Casi todos los resultados permanecen constantes en relación con los obtenidos con los datos básicos. Existe

pequeñas diferencias en el tiempo total de inundación, el volumen total de agua inyectada y la relación agua-petróleo acumulativo.

Los resultados se encuentran en la TABLA IV.

4.- CAMBIO DEL REGIMEN DE INYECCION DE AGUA.-

El cambio realizado en la tarjeta de datos de reservorio, corresponde a un régimen de 200 bbl/día, es decir se duplicó el régimen de inyección de agua. Las diferencias obtenidas son:

- a).- El tiempo de llenado, lógicamente disminuyó en la mitad.
- b).- El régimen de producción de petróleo de cada estrato se duplicó, trayendo como consecuencia la disminución en la mitad del tiempo total de inundación.
- c).- El volumen de inyección de agua se mantiene constante debido a que el régimen de inyección se duplica, pero el tiempo de inundación disminuye en la mitad.
- d).- La relación agua-petróleo acumulativo y la correspondiente a cada estrato se mantienen constantes. En general los estratos menos permeables se producen con una alta relación agua-petróleo.

Los resultados se encuentran en la TABLA V.

CAPITULO VII

ANALISIS DEL COSTO DE LA SOLUCION DEL PROGRAMA FORTRAN

El costo promedio de una computadora es de \$/107,360.00 correspondiente a 200 horas de uso al mes. Entonces el costo por hora es de \$/537.00. Sin embargo estos costos pueden ascen-
dar en un 30% más si se consideran los costos relacionados con personal, útiles de oficina, local etc.

El costo de las tarjetas IBM es de \$/60.00 el millar.

En la resolución del Programa Fortran correspondiente a la predicción del comportamiento de un reservorio "X" que produce por influjo de agua; utilizando la Computadora 1620 - la la Universidad Nacional de Ingeniería se empleó un tiempo total de 1.5 horas que equivale a un costo de:

$$1.5 \times 537 = \$/806.00$$

El número de tarjetas utilizadas es el siguiente:

Programa Fuente	54
Intermediato Output	37
Programa Objeto	206
Datos	32

Resultados 60

TOTAL DE TARJETAS: 389

El costo de las tarjetas es:

$$389 \times 0.06 = \$23.34$$

Entonces el costo total de la solución del programa es:

$$805 + 23 = \$828.00$$

Si se considera un factor de eficiencia de 70%, el costo en realidad es:

$$828 : 0.7 = \$1,800.00$$

Esto indudablemente representa un costo mínimo si se tiene en cuenta en forma específica el tiempo que demoraría la obtención de los resultados del problema en forma analítica.

FILLUP TIME= 250.DAYS

RECOVER OIL= 42038. STO

DELH	PERM	R	FW	CUMOP	DELOP	OSC	TIME	WI	CUMIOR	PHOR	FPRW
1.0	776.	.225	.203	9480	9480	93.1	352.	35232.	3.71	1.070	.000
1.0	454.	.361	.312	15176.	5695.	75.2	428.	42803.	2.82	1.32	.192
1.0	349.	.448	.390	18869.	3693.	65.4	484.	48444.	2.56	1.52	.297
1.0	308.	.494	.456	20802.	1932.	58.3	517.	51757.	2.48	1.71	.374
1.0	295.	.510	.517	21463.	661.	52.2	530.	53022.	2.47	1.91	.439
1.0	282.	.526	.572	22119.	655.	46.6	544.	54427.	2.46	2.14	.499
1.0	273.	.536	.624	22561.	442.	41.4	554.	55495.	2.45	2.41	.555
1.0	262.	.549	.672	23083.	521.	36.5	569.	56921.	2.46	2.73	.607
1.0	228.	.589	.712	24795.	1712.	32.0	622.	62271.	2.51	3.12	.656
1.0	187.	.651	.744	27371.	2576.	28.1	714.	71422.	2.60	3.55	.697
1.0	178.	.666	.774	28022.	651.	25.0	740.	74021.	2.64	3.99	.731
1.0	161.	.696	.801	29298.	1275.	22.1	797.	79774.	2.72	4.51	.762
1.0	159.	.700	.826	29447.	149.	19.5	805.	80538.	2.73	5.10	.789
1.0	148.	.719	.850	30236.	788.	17.0	851.	85148.	2.81	5.84	.816
1.0	127.	.758	.870	31879.	1643.	14.8	962.	96247.	3.01	6.75	.841
1.0	109.	.798	.886	33553.	1673.	12.8	1092.	109248.	3.25	7.76	.861
1.0	88.	.856	.900	36025.	2472.	11.2	1312.	131258.	3.64	8.90	.879
2.0	87.	.860	.926	36156.	130.	9.9	1325.	132577.	3.66	10.08	.893
1.0	77.	.886	.937	37275.	1118.	7.3	1477.	147780.	3.96	13.58	.921
1.0	71.	.903	.947	37975.	700.	6.2	1590.	159001.	4.18	16.02	.933
1.0	62.	.929	.956	39069.	1093.	5.2	1799.	179976.	4.60	19.17	.944
1.0	58.	.941	.964	39564.	495.	4.3	1914.	191423.	4.83	23.12	.953
1.0	54.	.952	.972	40025.	460.	3.4	2046.	204602.	5.11	28.59	.962
1.0	50.	.962	.979	40443.	418.	2.7	2199.	219931.	5.43	36.60	.970
2.0	47.	.968	.992	40772.	268.	2.0	2331.	233172.	5.72	49.34	.978
1.0	35.	.981	.997	41251.	539.	.7	3091.	309177.	7.49	140.93	.992
1.0	16.	1.000	1.000	42038.	786.	.2	6632.	663272.	15.77	449.97	.997

TABLA I

Resultados obtenidos con los datos básicos.

FILLUP TIME= 250.DAYS
DELH R

RECOVER OIL= 42038. STO
CUMOP OSC

WI

PWOR FPRW

PERM	R	FW	CUMOP	DELOP	OSC	TIME	WI	CUMOP	PWOR	FPRW	
1.0	776.	.225	.405	9480.	9480.	93.1	352.	35232.	3.71	1.070	.000
1.0	454.	.361	.547	15176.	5695.	56.9	452.	45236.	2.90	1.75	.389
1.0	349.	.448	.630	18869.	3693.	43.7	536.	53672.	2.84	2.28	.530
1.0	308.	.494	.691	20802.	1932.	35.9	590.	59052.	2.83	2.78	.614
1.0	295.	.510	.740	21463.	661.	30.1	612.	61243.	2.85	3.31	.676
1.0	282.	.526	.781	22119.	655.	25.4	638.	63818.	2.88	3.92	.726
1.0	273.	.536	.815	22561.	442.	21.5	658.	65873.	2.91	4.64	.769
1.0	262.	.549	.845	23083.	521.	18.1	687.	68743.	2.97	5.50	.805
1.0	228.	.589	.868	24795.	1712.	15.2	799.	79949.	3.22	6.54	.835
1.0	187.	.651	.886	27371.	2576.	13.0	997.	99744.	3.64	7.68	.860
1.0	178.	.666	.901	28022.	651.	11.2	1055.	105509.	3.76	8.85	.878
1.0	161.	.696	.914	29298.	1275.	9.7	1185.	118571.	4.04	10.24	.895
1.0	159.	.700	.927	29447.	149.	8.4	1203.	120341.	4.08	11.82	.909
1.0	148.	.719	.938	30236.	788.	7.2	1312.	131223.	4.33	13.80	.922
1.0	127.	.758	.946	31879.	1643.	6.1	1578.	157882.	4.95	16.21	.933
1.0	109.	.798	.954	33553.	1673.	5.2	1895.	189558.	5.64	18.92	.943
1.0	80.	.856	.960	36025.	2472.	4.5	2438.	243829.	6.76	21.95	.951
2.0	87.	.860	.970	36156.	130.	3.9	2471.	247112.	6.83	25.09	.957
1.0	77.	.886	.975	37275.	1118.	2.9	2856.	285655.	7.66	34.45	.968
1.0	71.	.903	.979	37975.	700.	2.4	3143.	314324.	8.27	40.95	.973
1.0	62.	.929	.983	39069.	1093.	2.0	3683.	368302.	9.42	49.35	.978
1.0	58.	.941	.986	39564.	495.	1.6	3979.	397941.	10.05	59.87	.982
1.0	54.	.952	.989	40025.	460.	1.3	4322.	432263.	10.79	74.45	.985
1.0	50.	.962	.992	40443.	418.	1.0	4723.	472390.	11.68	95.82	.988
2.0	47.	.968	.997	40712.	268.	.7	5072.	507219.	12.45	129.79	.991
1.0	35.	.981	.999	41251.	539.	.2	7089.	708932.	17.18	374.02	.997
1.0	16.	1.000	1.000	42038.	786.	0.0	16517.	1651735.	39.29	1198.07	.999

TABLA II

Cambio de la permeabilidad relativa.

FILLUP TIME= 530.DAYS				RECOVER OIL= 19851. STO							
DELH	PERM	R	FW	CUMOP	DELOP	OSC	TIME	WU	CUMWOR	PWOR	FPRW
1.0	776.	.225	.203	4476.	4476.	93.1	578.	57871.	12.92	1.070	.000
1.0	454.	.361	.312	7166.	2689.	75.2	614.	61446.	8.57	1.32	.192
1.0	349.	.448	.390	8910.	1744.	65.4	641.	64110.	7.19	1.52	.297
1.0	308.	.494	.456	9823.	912.	58.3	656.	65674.	6.68	1.71	.374
1.0	295.	.510	.517	10135.	312.	52.2	662.	66272.	6.53	1.91	.439
1.0	282.	.526	.572	10445.	309.	46.6	669.	66935.	6.40	2.14	.499
1.0	273.	.536	.624	10654.	208.	41.4	674.	67439.	6.32	2.41	.555
1.0	262.	.549	.672	10900.	246.	36.5	681.	68113.	6.24	2.73	.607
1.0	228.	.589	.712	11709.	808.	32.0	706.	70639.	6.03	3.12	.656
1.0	187.	.651	.744	12925.	1216.	28.1	749.	74961.	5.79	3.55	.697
1.0	178.	.666	.774	13233.	307.	25.0	761.	76188.	5.75	3.99	.731
1.0	161.	.696	.801	13835.	602.	22.1	789.	78905.	5.70	4.51	.762
1.0	159.	.700	.826	13905.	70.	19.5	792.	79265.	5.70	5.10	.789
1.0	148.	.719	.850	14278.	372.	17.0	814.	81442.	5.70	5.84	.816
1.0	127.	.758	.870	15054.	776.	14.8	866.	86683.	5.75	6.75	.841
1.0	109.	.798	.886	15844.	790.	12.8	928.	92823.	5.85	7.76	.861
1.0	88.	.856	.900	17012.	1167.	11.2	1032.	103216.	6.06	8.90	.879
2.0	87.	.860	.926	17074.	61.	9.9	1038.	103839.	6.08	10.08	.893
1.0	77.	.886	.937	17602.	528.	7.3	1110.	111019.	6.30	13.58	.921
1.0	71.	.903	.947	17932.	330.	6.2	1163.	116317.	6.48	16.02	.933
1.0	62.	.929	.956	18449.	516.	5.2	1262.	126222.	6.84	19.17	.944
1.0	58.	.941	.964	18683.	233.	4.3	1316.	131628.	7.04	23.12	.953
1.0	54.	.952	.972	18900.	217.	3.4	1378.	137851.	7.29	28.59	.962
1.0	50.	.962	.979	19098.	197.	2.7	1450.	145090.	7.59	36.60	.970
2.0	47.	.968	.992	19225.	126.	2.0	1513.	151342.	7.87	49.34	.978
1.0	35.	.981	.997	19479.	254.	.7	1872.	187234.	9.61	140.93	.992
1.0	16.	1.000	1.000	19851.	371.	.2	3544.	354446.	17.85	449.97	.997

TABLA III

Cambio en la saturación de aceite.

FILLUP TIME= 309.DAYS

RECOVER OIL= 42038. STO

DELH	PERM	R	FW	CUMOP	DELOP	OSC	TIME	WI	CUMOR	PMOR	FPR
1.0	776.	.225	.203	9480.	9480.	93.1	411.	41128.	4.33	1.070	.000
1.0	454.	.361	.312	15176.	5695.	75.2	486.	48699.	3.20	1.32	.192
1.0	349.	.448	.390	18869.	3693.	65.4	543.	54340.	2.87	1.52	.297
1.0	308.	.494	.456	20802.	1932.	58.3	576.	57654.	2.77	1.71	.374
1.0	295.	.510	.517	21463.	661.	52.2	589.	58919.	2.74	1.91	.439
1.0	282.	.526	.572	22119.	655.	46.6	603.	60324.	2.72	2.14	.499
1.0	273.	.536	.624	22561.	442.	41.4	613.	61391.	2.72	2.41	.555
1.0	262.	.549	.672	23083.	521.	36.5	628.	62817.	2.72	2.73	.607
1.0	228.	.589	.712	24795.	1712.	32.0	681.	68168.	2.74	3.12	.656
1.0	187.	.651	.744	27371.	2576.	28.1	773.	77319.	2.82	3.55	.697
1.0	178.	.666	.774	28022.	651.	25.0	799.	79917.	2.85	3.99	.731
1.0	161.	.696	.801	29298.	1275.	22.1	856.	85671.	2.92	4.51	.762
1.0	159.	.700	.826	29447.	149.	19.5	864.	86435.	2.93	5.10	.789
1.0	148.	.719	.850	30236.	780.	17.0	910.	91044.	3.01	5.84	.816
1.0	127.	.758	.870	31879.	1643.	14.8	1021.	102143.	3.20	6.75	.841
1.0	109.	.798	.886	33553.	1673.	12.8	1151.	115144.	3.43	7.76	.861
1.0	88.	.856	.900	36025.	2472.	11.2	1371.	137154.	3.80	8.90	.879
2.0	87.	.860	.926	36156.	130.	9.9	1384.	138473.	3.82	10.08	.893
1.0	77.	.886	.937	37275.	1118.	7.3	1536.	153677.	4.12	13.58	.921
1.0	71.	.903	.947	37975.	700.	6.2	1648.	164897.	4.34	16.02	.933
1.0	62.	.929	.956	39069.	1093.	5.2	1858.	185873.	4.75	19.17	.944
1.0	58.	.941	.964	39564.	495.	4.3	1973.	197319.	4.98	23.12	.953
1.0	54.	.952	.972	40025.	460.	3.4	2104.	210499.	5.25	28.59	.962
1.0	50.	.962	.979	40443.	418.	2.7	2258.	225827.	5.58	36.60	.970
2.0	47.	.968	.992	40712.	268.	2.0	2390.	239068.	5.87	49.34	.978
1.0	35.	.981	.997	41251.	539.	.7	3150.	315073.	7.63	140.93	.992
1.0	16.	1.000	1.000	42038.	786.	.2	6691.	669168.	15.91	449.97	.997

TABLA IV

Cambio en la saturación de agua intersticial.-

FILLUP TIME- 125.DAYS				RECOVER OIL- 42038. STO							
DELH	PERM	R	FW	CUMOP	DELOP	OSC	TIME	WI	CUMOR	FWOR	FPRW
1.0	776.	.225	.203	9480.	9480.	186.3	176.	35232.	3.71	1.070	.000
1.0	454.	.361	.312	15176.	5695.	150.4	214.	42803.	2.82	1.32	.192
1.0	349.	.448	.390	18869.	3693.	130.9	242.	48444.	2.56	1.52	.297
1.0	308.	.494	.456	20802.	1932.	116.6	258.	51757.	2.48	1.71	.374
1.0	295.	.510	.517	21463.	661.	104.5	265.	53022.	2.47	1.91	.439
1.0	282.	.526	.572	22119.	655.	93.2	272.	54427.	2.46	2.14	.499
1.0	273.	.536	.624	22561.	442.	82.8	277.	55495.	2.45	2.41	.555
1.0	262.	.549	.672	23083.	521.	73.1	284.	56921.	2.46	2.73	.607
1.0	228.	.589	.712	24795.	1712.	64.0	311.	62271.	2.51	3.12	.656
1.0	187.	.651	.744	27371.	2576.	56.3	357.	71422.	2.60	3.55	.697
1.0	178.	.666	.774	28022.	651.	50.1	370.	74021.	2.64	3.99	.731
1.0	161.	.696	.801	29298.	1275.	44.3	398.	79774.	2.72	4.51	.762
1.0	159.	.700	.826	29447.	149.	39.1	402.	80538.	2.73	5.10	.789
1.0	148.	.719	.850	30236.	788.	34.1	425.	85148.	2.81	5.84	.816
1.0	127.	.758	.870	31879.	1643.	29.6	481.	96247.	3.01	6.75	.841
1.0	109.	.798	.886	33553.	1673.	25.7	546.	109248.	3.25	7.76	.861
1.0	88.	.856	.900	36025.	2472.	22.4	656.	131258.	3.64	8.90	.879
2.0	87.	.860	.926	36156.	130.	19.8	662.	132577.	3.66	10.08	.893
1.0	77.	.886	.937	37275.	1118.	14.7	738.	147780.	3.96	13.58	.921
1.0	71.	.903	.947	37975.	700.	12.4	795.	159001.	4.18	16.02	.933
1.0	62.	.929	.956	39069.	1093.	10.4	899.	179976.	4.60	19.17	.944
1.0	58.	.941	.964	39564.	495.	8.6	957.	191423.	4.83	23.12	.953
1.0	54.	.952	.972	40025.	460.	6.9	1023.	204602.	5.11	28.59	.962
1.0	50.	.962	.979	40443.	418.	5.4	1099.	219931.	5.43	36.60	.970
2.0	47.	.968	.992	40712.	268.	4.0	1165.	233172.	5.72	49.34	.978
1.0	35.	.981	.997	41251.	539.	1.4	1545.	309177.	7.49	140.93	.992
1.0	16.	1.000	1.000	42038.	786.	.4	3316.	663272.	15.77	449.97	.997

TABLE V

Cambio del regimen de inyección de agua.

CONCLUSIONES

- 1.- La principal aseveración del método es considerar que la velocidad del frente de inundación en cualquier estrato es proporcional a la permeabilidad absoluta del estrato, y para una misma caída de presión esta velocidad es constante.
- 2.- Un método alternativo en la aplicación del cálculo de Stiles, consiste en agrupar las permeabilidades en varios rangos, y tratar el sistema como estratos de varios espesores y permeabilidades los cuales son promedios para el rango. Por este procedimiento el número de computaciones es reducido.
- 3.- La permeabilidad promedio para los datos asumidos de la formación, está dada por el cociente de su capacidad y espesor totales. Esta permeabilidad promedio es de 175 md. y los valores de permeabilidades adimensionales varían entre un máximo de 4.43 y un mínimo de 0.091. Los valores adimensionales de los espesores y las capacidades varían entre 0 y 1, y es fácil determinar las expresiones de la recuperación fraccional y de la fracción de producción de agua en función de estos valores adimensionales.
- 4.- El Programa dado a la computadora le permite pro

porcionar los resultados ya sea imprimidos por la máquina de escribir o perforados en tarjetas.

5.- Antes de realizar la compilación se recomienda - chequear el Programa Fuente utilizando el Pre Compilador.

6.- La compilación del Programa Fuente, es decir el paso del lenguaje Fortran al lenguaje de Máquina, se realiza obteniendo previamente el Intermediate Output, ya que para la compilación se utilizó el Fortran II.

7.- El Programa Objeto es un grupo de tarjetas perforadas por la computadora y representa el programa fuente en lenguaje de máquina. Es obtenido al pasar por la computadora el Intermediate Output.

8.- Un máximo de 100 permeabilidades, puede ser aceptado por la computadora.

9.- Usando el método de Stiles, la computadora puede producir:

- Tiempo de llenado: días.
- Acuífero recuperable: STO
- Recuperación fraccional.
- Fracción de producción de agua en la superficie.
- Producción acumulativa de petróleo: STO
- Incremento de petróleo recuperado por estrato:

STO

- Régimen de producción de petróleo: STD/año
- Tiempo total de inundación: días.
- Volumen acumulativo de agua impactado: M³is.
- Relación agua-petróleo acumulativo.
- Relación agua-petróleo para cada estrato.
- Fracción de producción de agua en el reservorio.

10.- Se acompaña a la Tesis todos los grupos de tarjetas que se han perforado para la obtención de los resultados del Programa Fortran; juntamente con el grupo de tarjetas correspondientes al Pre-Compilador y al Compilador Fortran.

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

- A** = Representa el producto M/S_0
- a** = Ancho de la formación, pies.
- c_p** = Capacidad total de los estratos completamente inundados: pie-mi.
- c_f** = Capacidad total de la formación, pie-mi.
- f_v^s** = Fracción de la producción de agua en la superficie.
- f_v^r** = Fracción de la producción de agua en el reservorio.
- h_p** = Espesor total completamente inundado: pies.
- h_f** = Espesor total de la formación, pies.
- K** = Permeabilidad absoluta.
- K_v** = Permeabilidad efectiva al agua.
- K_o** = Permeabilidad efectiva al aceite.
- K_{rv}** = Permeabilidad relativa al agua.
- K_{ro}** = Permeabilidad relativa al aceite.
- M** = Radio de movilidad.
- N** = Petróleo inicial in situ: STB.
- N'** = Petróleo recuperable después de una completa inundación del área.
- ΔN** = Recuperación debido al desplazamiento del agua, considerando la eficiencia de barrido.
- q_v** = Régimen de producción de agua en el reservorio: Bbls.

- Q_o = Régimen de producción de aceite en el reservorio: Bbls/día
 Q_w = Régimen de producción de agua: STB/día
 Q_o = Régimen de producción de petróleo: STB/día
 R = Recuperación fraccional.
 S_o = Saturación de aceite después de la recuperación primaria.
 S_{wi} = Saturación de agua intersticial.
 t = Tiempo de llenado: días.
 Δt = Tiempo de inundación de cada estrato: días.
 T = Tiempo total acumulativo de inundación, incluido el tiempo de llenado: días.
 NI = Inyección acumulativa de agua: Bbls.
 WOR_o = Relación agua-petróleo acumulativo.
 β_o = Factor de volumen de formación después de la recuperación primaria.
 g = Porosidad efectiva.
 μ_w = Viscosidad del agua: cp.
 μ_o = Viscosidad del petróleo: cp.

REFERENCIAS

- 1.- Applied Petroleum Reservoir Engineering: Capítulo 7. Craft & Hawkins.
- 2.- Programación Fortran: Daniel D. Mc Cracken.
- 3.- Basic Programming Concepts and the IBM-1620: Lesson & Dittry.
- 4.- Electronic Data Processing System.- IBM 1620. Manual de referencia.
