

ESPOL-CIB
INVENTARIO FÍSICO

11 SEP 2018

POR:

Liliana O.

T

622.242

Nº 73

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

6/3/03
Ronny Linares



D-6941

"APLICACION DEL METODO IMPLICITO DE DIRECCION
ALTERNANTE A UN MODELO DE CINCO PUNTOS"

TESIS DE GRADO

PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO DE PETROLEO

D-6941

INVENTARIADO

POR:

POR: 28/11/2015

RAFAEL NUÑEZ SATURNO

ESPOL-CIB
INVENTARIO FÍSICO

16 SEP 2019

POR: *M*
Ing. María José Nieto M.
ASISTENTE ACTIVOS FIJOS-CIB

GUAYAQUIL-ECUADOR

SEPTIEMBRE, 1975

Liliana
15/12/17

"APLICACION DEL METODO IMPLICITO DE DIRECCION
ALTERNANTE A UN MODELO DE CINCO PUNTOS"

DIRECTOR DE TESIS



ING. CARLOS J. ARNAO

AUTOR



RAFAEL NUÑEZ SATURNO

DECLARACION EXPRESA:

DECLARO QUE: Hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis son de mi exclusiva responsabilidad y que el patrimonio intelectual de la misma corresponde a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA - DEL LITORAL.

(Reglamento de Exámenes y títulos Profesionales de la ESPOL).

AGRADECIMIENTO

A la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL LITORAL que me ha proporcio-
nado las facilidades para la cul-
minación de esta profesión.

A los que durante mis años de estudio
fueron mis profesores y que con sus
enseñanzas me formaron moral e in-
telectualmente.

A los profesores del Departamen-
to de Ingeniería de Geología,
Minas y Petróleos, que de una
manera u otra han colaborado
en la elaboración de esta te-
sis.

Al Ing. CARLOS J. ARNAO,
Director de Tesis, quien
con sus conocimientos me
guió en forma acertada en
el desarrollo de este traba
bajo.

A los compañeros del Centro de
Computación que colaboraron
en el desarrollo de los pro-
gramas de Computación.

A Cecilia Pazmiño B.

DEDICATORIA

Con todo cariño:

a mis padres:

RAFAEL NUNEZ Y.

GIOCONDA SATURNO M.

*los que desinteresadamente me
han permitido durante tantos
años formarme una profesión.*

A mis hermanos:

COSME Y JOSEFINA

MANUEL

PATRICIO Y ROSSANA

MARIO

JAIME

CARLOS

MONICA

A mis sobrinos:

ROSSANITA

JENNIFER

MARIUXI

JOHN

SALOMON

Con todo mi amor a "CHABY"
quien siendo mi prometida
primero y mi esposa ahora,
con su comprensión y cariño
me ha ayudado desde estudian
te a seguir siempre adelante
en mis estudios.

INDICE

	Pág.
INTRODUCCION	1
RESUMEN	4
CAPITULO I	6
MODELO NUMERICO	20
A. El modelo Numérico	20
A.1. La ecuación diferencial	
B. El modelo Físico	22
B.1. Definición del modelo físico	23
C. Condiciones iniciales y de borde	25
D. Procedimiento para estudiar el comportamiento del modelo.	27
D.1. Cálculo de la presión	18
D.2. Cálculo del movimiento del frente	18
CAPITULO II	23
METODO IMPLICITO DE DIRECCION ALTER NANTE.	
A. Principio para la solución de e- cuaciones diferenciales.	24
A.1. El sistema de malla	24
A.2. Las ecuaciones de flujo en diferencias finitas.	26

	Pág.
B. El método Implícito	30
B.1. El ADIP aplicado a la ecuación de Laplace.	31
B.2. Chequeo de la convergencia	35
CAPITULO III	37
ESTRUCTURA Y SOLUCIÓN DE LAS MATRICES RESULTANTES	
A. Estructura de las matrices	38
B. Solución de los sistemas de ecuaciones.	40
B.1. Aplicación del método de Thomas.	42
CAPITULO IV	44
PROGRAMA DE COMPUTADORA	
A. Proceso del programa	44
B. Diagramas de flujo	47
C. Programas	67
CAPITULO V	79
ANALISIS DE LOS RESULTADOS	
A. Modelo con características homogéneas de su producto permeabilidad espesor.	80
B. Modelo con características heterogéneas de su producto permeabilidad - espesor.	82

	Pág.
CAPITULO VI	85
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	87
APENDICE A	88
APENDICE B	98
APENDICE C	100
APENDICE D	103
APENDICE E	106
APENDICE F	110
MONOGRAMAS	116
TABLAS	118
FIGURAS	158
BIBLIOGRAFIA	161

INTRODUCCION

Para todos nos es conocida la importancia que posee el petróleo, tanto en el campo energético como en el petroquímico, sus propiedades físico-químicas hacen de él un fluido muypreciado en este tiempo.

Los que estamos relacionados con la industria del petróleo y más específicamente con su explotación, conocemos que después de la Recuperación Primaria de este fluido, queda remanente dentro del yacimiento la mayor parte del volumen de petróleo que había inicialmente antes de empezar la explotación. Sabemos también que una parte de este petróleo remanente es posible recuperarlo aplicando una adecuada técnica de recuperación que recibe el nombre de Recuperación Secundaria. Esta última técnica consiste básicamente en inyección de algún fluido que puede ser agua, gas, polímeros, etc. para que estos vayan a ejercer una acción de "barrido" dentro del yacimiento, de tal manera que van a empujar el aceite que había quedado dentro del reservorio.

Con el fin de tener una más eficiente acción de barrido por parte del fluido inyectado, se han hecho estudios de desplazamiento y barrido en modelos de laboratorio. A

sumiendo que este comportamiento del fluido en el modelo, puede ser similar al que tendría el fluido que se inyecta en el reservorio, tendríamos una idea de la eficiencia del barrido y de esta manera podríamos estudiar la forma de mejorar la operación. Estos simuladores son de algunos tipos y entre otros tenemos: redes resistencia-capacitancia, modelos electrolíticos, rayos X, computadores analógicos, etc.

Una nueva herramienta para estudiar reservorios es la simulación numérica de yacimientos. En esta técnica de simular, primero se escriben las ecuaciones de flujo en forma de ecuaciones diferenciales parciales para cada una de las fases presentes en el reservorio, luego se expresan estas por sus aproximaciones en diferencias finitas. Una malla es colocada sobre el reservorio y a cada uno de los nodos de esta se les asigna los valores de porosidad, permeabilidad, saturación, espesor, elevación, presión. A los fluidos se les asigna valores de viscosidad, factor volumétrico, solubilidad, densidades, compresibilidades. A la roca se le asignan valores de compresibilidad. Se asigna valores de tasas de flujo en los pozos para el fluido que se produce y de esta manera podemos hacer una predicción del comportamiento de los flui-

dos por medio de un modelo matemático.

Los métodos para resolver las ecuaciones en diferencias finitas indicadas anteriormente, son diversos y nosotros hemos escogido el Método Implícito de Dirección Alternante propuesto por Peaceman y Rachford en 1955. El método se lo encuentra explicado en el Capítulo II.

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado una simulación matemática de la manera como fluye el fluido desplazante al ser inyectado dentro de un modelo de 5 pozos. Al modelo se le han asignado valores teóricos en su totalidad, pero pueden adoptarse valores reales de algún campo sin ningún inconveniente, siempre que se consideren las restricciones hechas.

Las ecuaciones diferenciales de flujo de fluidos se las ha desarrollado en sus aproximaciones por diferencias finitas, y estas a su vez han sido resueltas mediante el Método Implícito de Dirección alternante. Una vez que las presiones se han estabilizado en cada punto del modelo, se procede a seguir la trayectoria de cincuenta puntos colocados alrededor del pozo inyector.

Las sucesivas posiciones que van teniendo estos puntos nos van indicando las posiciones del frente de barrido. El momento en que uno cualquiera de estos puntos llega al pozo productor se considera que se ha alcanzado la ruptura.

Este análisis ha sido hecho para diferentes valores de presión inicial, diferentes ratas de inyección y diferentes valores del producto permeabilidad-espesor.

Para realizar los cálculos del proceso se ha utilizado un computador IBM-1130. Esta labor acompañada de la entrada y salida de datos, la hemos hecho por medio de cuatro programas de computadora.

CAPITULO I

MODELO NUMERICO

A. EL MODELO NUMERICO⁽¹⁾

Para poder presentar las características físicas que influyen en el desplazamiento de los fluidos sean estos a ceite, gas o agua, dentro de un reservorio, al emplear un modelo numérico es necesario que tomemos en consideración al menos dos importantes puntos.

- a) Describir el proceso o cambios que van a realizarse dentro del yacimiento, por medio de una adecuada descripción de los mecanismos del reservorio, los cuales para su representación dentro del modelo matemático estarán dados en forma de ecuación diferencial básica.
- b) Una definición precisa de las características físicas, la cual necesita que los datos obtenidos, examinados e interpretados presten la información suficiente para poder definir detalladamente las propiedades físicas de nuestro sistema en su totalidad.

A.1. LA ECUACION DIFERENCIAL^(1,2)

Muchos tipos de fenómenos pueden ser simulados mate-

máticamente por medio de modelos, cada uno de estos modelos ofrece ventaja sobre otros en cuanto a la ayuda que presta para poder realizar cierto tipo de estudio. Es así como la ecuación de flujo para flúidos ligeramente compresibles, sea esta en una, dos, o, tres dimensiones nos ofrecen muchas ventajas para estudiar el flujo de flúidos en reservorios.

Estos modelos se los puede utilizar para estudios como: problemas de un pozo (restauración de presión o caídas de presión con sistemas coordinado cartesiano o cilíndrico); calcular líneas de flujo en reservorios heterogéneos o en reservorios con cualquier arreglo de pozos; obtener modelos de flujo con razones de movilidad unitaria o hacer ajuste histórico en reservorios de aceite donde pequeños cambios de saturación han ocurrido.

En nuestro caso haremos un estudio de modelos de flujo con una razón de movilidad igual a la unidad, por lo que una de las asunciones básicas hechas para los propósitos de este estudio es el de que una clara interfase entre el agua y el aceite es formada y un solo flúido, que puede ser agua o aceite está fluyendo respectivamente en la región predominantemente saturada de agua o pre

dominantemente saturada de aceite, dentro del reservorio.

La ecuación de flujo tridimensional para fluido li-
geramente compresible, donde se desprecian los efectos
de la gravedad y presión capilar, y se asume que los gra-
dientes de presión en las direcciones x, y, z son peque-
ños, es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_x}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_y}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_z}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \phi c \frac{\partial p}{\partial t} \quad I-1$$

Donde:

- P = Presión del fluido (atm)
- Kx = Permeabilidad en la dirección x (Darcy)
- Ky = Permeabilidad en la dirección y (Darcy)
- Kz = Permeabilidad en la dirección z (Darcy)
- μ = Viscosidad (cp)
- ϕ = Porosidad (adimensional)
- x,y,z = Distancia (cm.)

Para flujo en una dimensión, solo uno de los térmi-
nos del lado izquierdo de la ecuación I-1 permanece, -
mientras que los otros dos son iguales a cero.

Para el caso de flujo bidimensional permanecen dos

términos del lado izquierdo de la ecuación 1-1, mientras el otro es cero.

Nuestro estudio lo haremos en un modelo bidimensional, luego la ecuación diferencial básica que describirá la distribución de presión en el reservorio, para flujo monofásico a cada lado de la interfase será:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{\phi c \mu}{K} \frac{\partial P}{\partial t} \quad 1-2$$

En la ecuación 1-2 los efectos de gravedad son despreciables y los valores de permeabilidad, viscosidad, μ , espesor se los considera constantes.

Si extendemos la ecuación 1-2 incorporando variación de la movilidad del fluido y el espesor h (cm) de la formación, tendremos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \phi c h \frac{\partial P}{\partial t} \quad 1-3$$

Para nuestro estudio en vista de que vamos a hacer el análisis del desplazamiento de un solo fluido; que en este caso es el agua, el cual suponemos que empuja al petro

leo que se halla bajo iguales condiciones físicas, como se lo expresé anteriormente, hacemos las siguientes restricciones:

- a) Que la movilidad del fluido desplazado y el fluido - desplazante, en este caso el aceite y el agua, respectivamente son iguales.
- b) Que los fluidos son incompresibles.
- c) Que la gravedad y presión capilar no afectan la forma del frente de invasión.
- d) Que la viscosidad es constante.

Luego considerando estas restricciones para la ecuación 1-3, tendremos que esta se reduce a la forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kh \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Kh \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad 1-4$$

Que, es la ecuación de Laplace modificada para permitir el uso de coeficientes variables. De esta forma nosotros en nuestro estudio vamos a considerar variación del producto Kh en las direcciones x i y .

Sí nosotros agregamos un término de inyección a la e-

ecuación I-4, vamos a tener:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kh \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Kh \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{\mu q}{\Delta x \Delta y} = 0 \quad \text{I-5}$$

Donde q está dado en cm^3/seg .

La ecuación I-5 describe el flujo de régimen permanente o de estado continuo. La deducción de las ecuaciones presentadas hasta este momento en nuestro desarrollo del modelo numérico se encuentra en el Apéndice A.

B. EL MODELO FISICO^(1,3)

Basados en el hecho de que en la explotación de un yacimiento, sea este de petróleo o de gas un factor importante que incide en la recuperación final de los hidrocarburos (es decir en el volumen total a recuperarse durante la vida del reservorio), es el arreglo de pozos, y teniendo en cuenta que dentro de estos arreglos el más utilizado es el de 5 pozos, especialmente cuando se trata de aplicar métodos de recuperación secundaria, o cuando se trata de hacer estudios de laboratorio como son: visualizados res de fluido, electrolíticos, mallas RC, etc: nosotros he mos escogido el modelo de 5 puntos como el modelo físico.

al cual vamos a aplicar nuestro modelo matemático.

B.1. DEFINICION DEL MODELO FISICO

El modelo de 5 puntos no es otra cosa que un arreglo de 5 pozos, de los cuales 4 son inyectoros y uno es productor. El pozo productor se encuentra en el centro del arreglo y los cuatro inyectoros en las esquinas del cuadrado, que constituye el arreglo (Figura I-1).

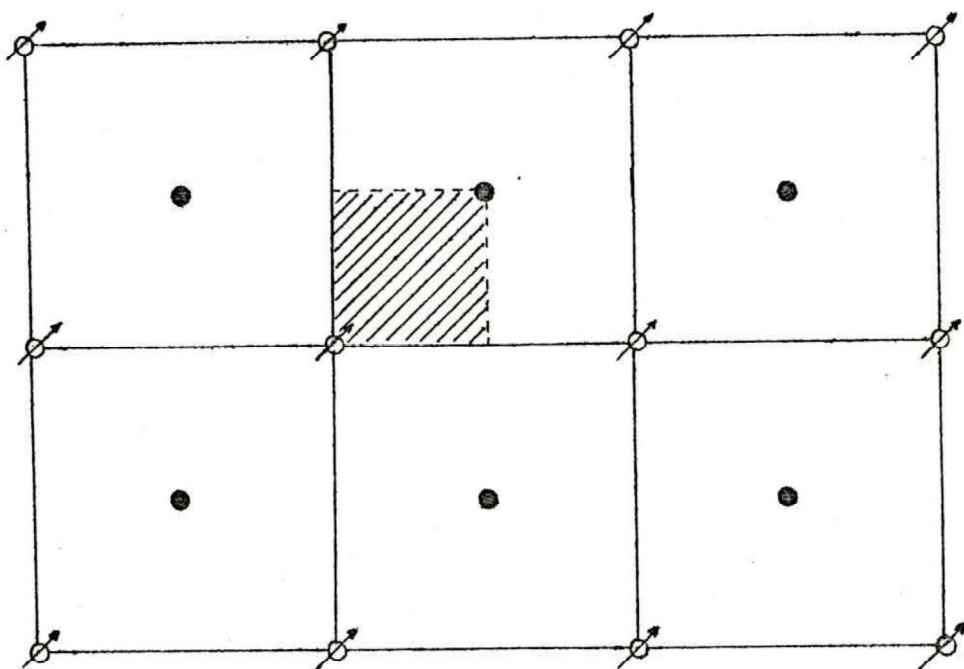


FIGURA I-1

Donde:

⊗ = Pozo inyector

● = Pozo productor

El modelo lo vemos ampliado en figura I-2

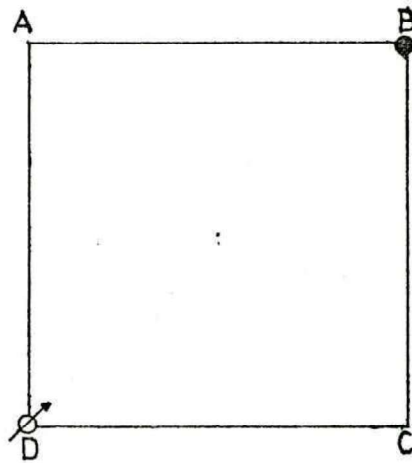


FIGURA I-2

Aquí en este arreglo, la relación pozo inyector a pozo productor está dada por:

$$n = \frac{R P I}{R P P}$$

Donde:

RPI = Razón del pozo inyector.

RPP = Razón del pozo productor

Razón del pozo inyector es igual a uno dividido por el número de pozos productores que se encuentran influenciados por este.

Razón del pozo productor es igual a uno dividido por el número de pozos inyectores que lo influyen.

En este caso el valor de r es igual a 1.

Es en un modelo físico similar al que vemos en la figura I-2, en el que nosotros vamos a considerar características geológicas y petrofísicas que nos permitan aplicar nuestras ecuaciones de flujo.

Para nuestro estudio hemos hecho las siguientes asunciones para el modelo físico:

- a) Que las características geológicas y petrofísicas como: porosidad, permeabilidad, espesor, compresibilidad, temperatura, viscosidad, y saturaciones de los fluidos desplazante y desplazado, son homogéneas dentro del yacimiento.
- b) La cantidad de fluido que penetra en el yacimiento -

por un pozo inyector, es distribuido en partes iguales a los cuatro pozos productores que se hayan influenciado por este pozo. Además como se considera el medio poroso homogéneo, existirá simetría de flujo y el fluido no pasará en ningún momento de los límites del modelo que son: AB, BC, CD, y, DA en la figura I-2. Por lo tanto se asume que la permeabilidad es cero en estos límites.

c) La presión inicial es igual en todo el modelo.

Debemos indicar que para nuestro estudio de este modelo físico hemos considerado estas asunciones, pero también hemos ampliado el estudio considerando variación del producto permeabilidad-espesor, eso sí respetando las demás asunciones.

El punto b) nos permite hacer un estudio del modelo constituido por el pozo inyector y el pozo productor, sin que estos se vean influenciados por la acción de los demás pozos del arreglo. Además esta consideración nos da las condiciones de borde que necesita nuestro modelo matemático.

La consideración asumida en c) nos permite dar las condiciones iniciales a nuestro modelo y nos indica

que en el instante inicial no existe movimiento de fluído dentro del modelo.

Este estado de equilibrio será roto una vez que se empiece a inyectar fluido por el pozo inyector, pues esto hará que aumente la presión cerca de este pozo y por tanto empezará a haber desplazamiento de fluidos en la dirección de la menor presión.

C. CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE

Será a la ecuación I-5 que nosotros vamos a hallarle una solución y para ello es necesario dar a ésta condiciones iniciales y de borde.

Puesto que consideramos el estudio de un modelo que tiene su presión estabilizada en el instante inicial, vamos a tener que sus condiciones iniciales serán:

$$P(x, y, t) = P_i \text{ a } t = 0$$

Donde:

P_i = Presión inicial.

Debido a las asunciones hechas para el modelo, las

condiciones de borde se ajustan a las del tipo Neumann y son las siguientes:

$$\frac{\partial P}{\partial x} (0, y) = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} (L_1, y) = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} (x, 0) = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} (x, L_2) = 0$$

Donde:

L_1 = longitud del modelo en dirección x

L_2 = longitud del modelo en dirección y

En apéndice E, se tiene tipos de condiciones de borde.

D. PROCEDIMIENTO PARA ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO DEL MODELO⁽¹⁾

Para hacer un estudio del comportamiento de nuestro modelo los cálculos se los ha dividido en dos partes principales:

- a) Cálculo de la presión en cada punto del modelo.
- b) Cálculo del movimiento del frente de barrido.

D.1. CALCULO DE LA PRESION

Necesitamos hallar una solución a la ecuación I-5 - que es la que constituye nuestro modelo, pero para ello nos valemos de la ecuación I-3 con un término de inyección añadido. Es decir que nosotros vamos a resolver esta última ecuación en vez de la I-5, por los motivos que damos a continuación.

La ecuación I-3 antes mencionada, nos permite obtener la distribución de presión en el reservorio en función del tiempo. Conforme transcurre este tiempo las presiones se irán estabilizando, hasta que en algún momento, en cualquier punto del reservorio estas ya no cambian con el tiempo, entonces se dice que el reservorio se encuentra estabilizado y se habla del estado "continuo" en el cual $\frac{\partial P}{\partial t} = 0$, lo que precisamente corresponde a una distribución de presión dada por I-5.

Se puede también por métodos numéricos semejantes al utilizado en este trabajo, encontrar una solución directa para la ecuación I-5.

D.2. CALCULO DEL MOVIMIENTO DEL FRENTE

El problema se lo comienza colocando un número arbi-

trario de puntos en un pequeño círculo alrededor del pozo de inyección, luego el movimiento de cada punto es computado en forma de pasos durante todo el proceso del proyecto. En esta forma podemos obtener la localización del frente para un nivel de tiempo, uniendo todos los puntos correspondientes a ese nivel.

Por experiencias se ha encontrado que con más o menos 50 puntos se puede tener una correcta localización del frente, en casi todos los problemas.

Cuando la presión se ha estabilizado en el modelo y se tiene una distribución de la presión, podemos calcular los componentes de la velocidad en los sentidos x e y , en cada punto de intercepción de la malla que se ha superpuesto al modelo cuando se calculaban las presiones. Las fórmulas que utilizamos en el cálculo de las velocidades es la ley de Darcy:

$$v_x = \frac{K_x}{\phi \mu S_{od}} \frac{\Delta P_x}{\Delta x} \quad \text{I-6}$$

$$v_y = \frac{K_y}{\phi \mu S_{od}} \frac{\Delta P_y}{\Delta y} \quad \text{I-7}$$

Donde:

v = velocidad real⁽⁶⁾ (cm/seg)

K = permeabilidad (Darcy)	ϕ = Porosidad
μ = viscosidad (cp)	S_{od} = Saturación de aceite desplazable.
ΔP = cambio de presión (atm)	
Δx o Δy = cambio de longitud (cm)	

De entre las velocidades computadas se utiliza la máxima velocidad, para determinar un intervalo de tiempo que permita a cualquier punto desplazarse una especificada distancia máxima durante ese paso.

De esta manera se garantiza que el gradiente de velocidad local, no va a afectar la precisión del procedimiento trazado.

La forma de determinar la velocidad a la que algún punto se está moviendo, en cualquiera de las celdas de la malla, es por medio de una doble interpolación lineal entre las velocidades en las cuatro esquinas de la cela. Esta interpolación la llevamos a efecto de la siguiente manera:

Conocemos que la velocidad en un plano bidimensional está dada por sus componentes en x i y de la forma:

$$v = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2}$$

Luego si tenemos cuatro velocidades localizadas en las esquinas de una de las celdas de la malla, como se ve en la Figura I-3:

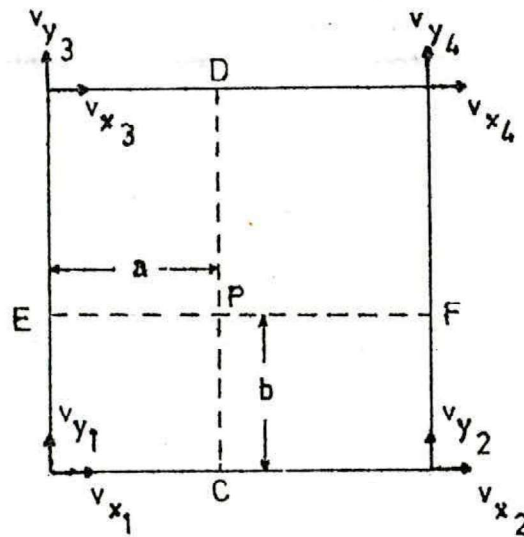


FIGURA I-3

Podemos determinar la velocidad de un punto P dentro de la celda al interpolar estas velocidades en las esquinas, basándonos en la fórmula de interpolación lineal:

$$v = \alpha v_b - (1 - \alpha)v_a \quad \text{I-9}$$

Donde:

v = velocidad en P

v_a, v_b = velocidades entre las que va a interpolarse.

$$\alpha = \frac{\text{distancia de P a la posición de } v_a}{\text{distancia entre } v_a \text{ y } v_b}$$

Para un punto cualquiera P localizado dentro de la celda a un porcentaje de distancia a y b en sentidos x i y respectivamente, tendremos interpolando las velocidades de dos en dos:

Para velocidades en x:

$$v_{x_c} = av_{x_2} + (1 - a)v_{x_1}$$

Luego:

$$v_{x_D} = av_{x_4} + (1 - a)v_{x_3}$$

I-10

$$v_{x_P} = bv_{x_D} + (1 - b)v_{x_c}$$

Las velocidades en y:

$$v_{y_E} = bv_{y_3} + (1 - b)v_{y_1}$$

Luego:

$$v_{y_F} = bv_{y_4} + (1 - b)v_{y_2}$$

I-11

$$v_{y_P} = av_{y_F} + (1 - a)v_{y_E}$$

A continuación se obtiene las nuevas coordenadas del

punto, multiplicando los componentes de la velocidad por el intervalo de tiempo y sumando este producto a las coordenadas que tenían en el nivel de tiempo anterior. Esto se consigue con las fórmulas:

$$x_{t+1} = x_t + v_{x,t} \Delta t \quad 1-12$$

$$y_{t+1} = y_t + v_{y,t} \Delta t \quad 1-13$$

Cada punto es movido a su nueva posición y esta es comparada con las coordenadas del pozo de producción. Si cualquier punto penetra dentro de un radio especificado alrededor de cualquier pozo de producción, se considera que se ha llegado a la ruptura. En este momento termina el cálculo del avance del frente.

CAPITULO II

METODO IMPLICITO DE DIRECCION ALTERNANTE

A. PRINCIPIOS PARA LA SOLUCION DE ECUACIONES DIFERENCIALES

Las ecuaciones diferenciales como la I-3 o como la I-5 cuyos coeficientes son variables, son ecuaciones de tipo no lineal y no pueden ser resueltas por métodos analíticos conocidos, excepto para casos muy especiales.

Para resolver modelos matemáticos que no son otra cosa que ecuaciones matemáticas, existen dos técnicas disponibles:

a) Métodos Convencionales

Consisten en usar suposiciones simplificadoras de las ecuaciones de flujo o reemplazarlas por otras ecuaciones más sencillas y resolverlas luego por medio de métodos analíticos.

Así para las ecuaciones de flujo se puede asumir que los coeficientes son constantes y se simplifica su resolución.

b) Métodos Numéricos

Consisten en aproximar las ecuaciones de flujo por di

ferencias finitas y luego resolver estas ecuaciones de diferencias usando cualquiera de las técnicas para solución de este tipo de ecuaciones.

Estas técnicas de solución de ecuaciones de diferencias son variados, pero se trata siempre de escoger un método que nos ahorre tiempo de computación, nos proporcione resultados más precisos y nos garantice estabilidad⁽⁵⁾ de la solución bajo las condiciones que demos a la ecuación.

A.1. EL SISTEMA DE MALLA

En los trabajos de reservorio se acostumbra a utilizar uno de los dos tipos de mallas siguientes: los de bloque centrado, en los cuales el punto se lo considera en el centro del bloque; y los de punto (nodo) en cada unión de las líneas del enrejado. Una explicación sobre estos tipos de mallas las tenemos en el Apéndice D.

Además de que la superposición de la malla en el reservorio, nos permite obtener un esqueleto de referencia para definir características físicas en cada punto del yacimiento, nos hace posible escribir la ecuación

de flujo para cada nodo que se encuentra dentro del reservorio, y de esta manera obtenemos un sistema de ecuaciones que al ser resueltos por métodos que veremos posteriormente. La solución de este sistema de ecuaciones nos dá valores puntuales para la presión, lo que significa que en vez de hallar una solución continua, hemos encontrado una solución discreta, ya que los valores de presión estarán dados en el nodo o en el centro de la celda, dependiendo del tipo de malla. Un ejemplo de malla sobre un reservorio lo tenemos en Fig. II-1.

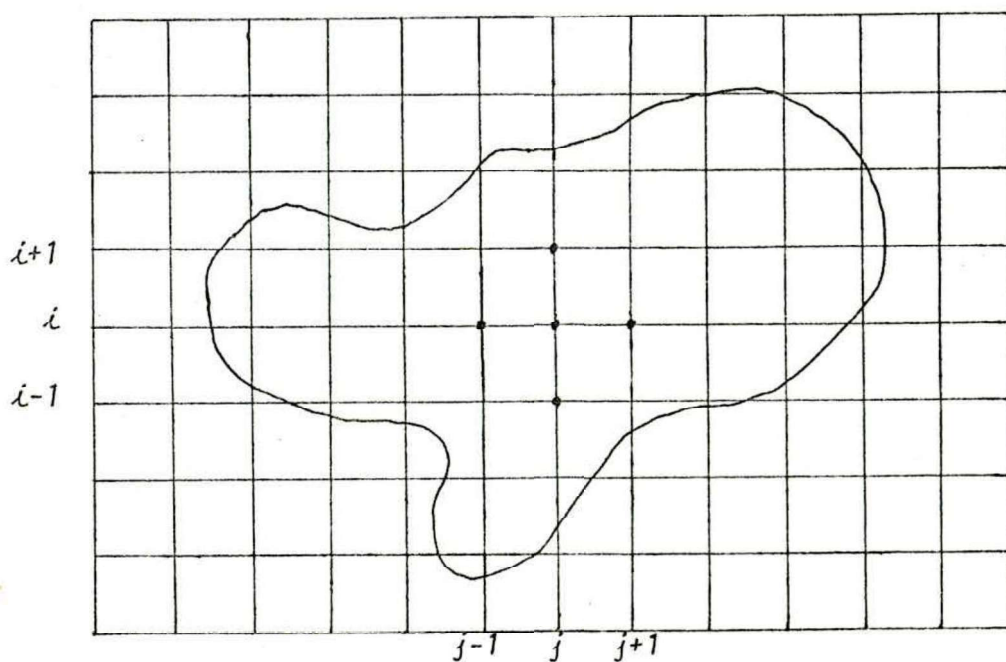


FIGURA II-1

pudiendo cambiárselos según las necesidades de precisión y las técnicas de solución y computación nos permitan. Valores grandes de Δx o Δy aumentan el error de truncación, mientras que valores muy pequeños para Δt aumentan el tiempo de cálculo.

Para nuestro estudio hemos supuesto al modelo físico un tipo de malla con el de la Fig. N y M el número de intervalos en las direcciones x e y respectivamente. Estos intervalos tienen una longitud $\Delta x = \Delta y$.

A.2. LAS ECUACIONES DE FLUJO EN DIFERENCIAS FINITAS

Consideremos la ecuación de difusividad en dos dimensiones I-2 (en unidades de campo):

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{\phi \mu c}{6.328} \frac{\partial P}{\partial t}$$

La igualdad I-2 es una ecuación diferencial de tipo parabólico⁽⁴⁾ (una explicación sobre tipos de ecuaciones diferenciales la tenemos en apéndice B). Si en esta ecuación consideramos variación del producto permeabilidad - espesor y le agregamos un término de inyección, tendremos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kh \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Kh \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{\mu q}{1.127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi_1 c h}{6.328} \frac{\partial P}{\partial t} \quad \text{II-1}$$

Según se ve en apéndice C, las derivadas pueden ser reemplazadas por su aproximación en diferencias finitas. Es así como para un punto i, j (Figura II-2), tendremos que:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kh \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{\frac{(Kh)_{i,j+1/2} (P_{i,j+1} - P_{i,j})}{\Delta x} - \frac{(Kh)_{i,j-1/2} (P_{i,j} - P_{i,j-1})}{\Delta x}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(Kh \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \frac{\frac{(Kh)_{i+1/2,j} (P_{i+1,j} - P_{i,j})}{\Delta x} - \frac{(Kh)_{i-1/2,j} (P_{i,j} - P_{i-1,j})}{\Delta y}}{\Delta y}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n}{\Delta t}$$

En estas expresiones n y $n+1$ representan dos niveles sucesivos de tiempo cuya diferencia es Δt , y los subíndices $i + 1/2$, $i - 1/2$, $j + 1/2$, $j - 1/2$ nos indican posición entre los nodos.

Donde:

□ = Permeabilidad-espesor en sentido x .

○ = Permeabilidad-espesor en sentido y .

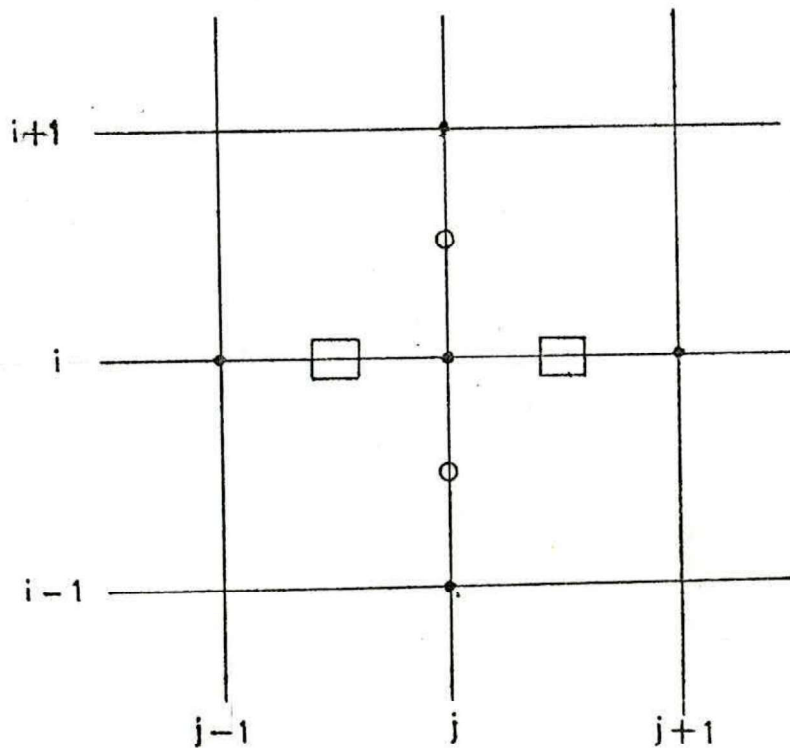


FIGURA II-2

Reemplazando las derivadas por sus aproximaciones en diferencias dentro de la ecuación II-1, tendremos:

$$\frac{(Kh)_{i,j+1/2} (P_{i,j+1} - P_{i,j})}{\Delta x} - \frac{(Kh)_{i,j-1/2} (P_{i,j} - P_{i,j-1})}{\Delta x} +$$

$$\frac{(Kh)_{i+1/2,j} (P_{i+1,j} - P_{i,j})}{\Delta y} - \frac{(Kh)_{i-1/2,j} (P_{i,j} - P_{i-1,j})}{\Delta y} -$$

$$\frac{\mu q_{i,j}}{1.127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi \mu c h}{6.328 \Delta t} (P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n)$$

II-2

Entonces:

Donde:

i = número de la fila

j = número de la columna

Δx = distancia entre dos nodos en una fila

Δy = distancia entre dos nodos en una columna

De esta manera las ecuaciones de diferencias se las define con respecto al espacio coordenado solo en los puntos (x_i, y_i) ; llamando:

$$x_j = j\Delta x \quad 0 < j < N$$

$$y_i = i\Delta y \quad 0 < i < M$$

N = Número de intervalos de espacio en x .

M = Número de intervalos de espacio en y .

Y el tiempo lo definiremos solo en los valores discretos dados por:

$$t_m = \sum_{n=0}^m \Delta t_n$$

Donde:

t_n = intervalos de tiempo

Los valores que demos a Δx , Δy , Δt son arbitrarios

$$\frac{(Kh)_{i,j+1/2} (P_{i,j+1} - P_{i,j}) - (Kh)_{i,j-1/2} (P_{i,j} - P_{i,j-1})}{(\Delta x)^2} +$$

$$\frac{(Kh)_{i+1/2,j} (P_{i+1,j} - P_{i,j}) - (Kh)_{i-1/2,j} (P_{i,j} - P_{i-1,j})}{(\Delta y)^2} -$$

$$\frac{\mu q_{i,j}}{1.127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi \mu c h}{6.328} \frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n}{\Delta t} \quad \text{II-3}$$

La ecuación I-5 en su forma de aproximación por diferencias finitas, tendrá la forma de II-3, con su segundo miembro, igual a cero.

B. EL METODO IMPLICITO

Los métodos implícitos de dirección alternante (ADIP) han recibido extensas discusiones y usos en la industria del petróleo^(1,5). Estos métodos son los que más se utilizan cuando se desea resolver ecuaciones de simulación para flujo de fluidos, pero debemos indicar que la generalidad en su utilización no hace que ellos sean más económicos para todos los tipos de problemas. El método más eficiente en el presente para regiones rectangulares es uno propuesto por Peaceman y Rachford⁽⁷⁾ en 1.955.

Se han hecho estudios numéricos y estas parecen indicar que se lo puede utilizar con ventajas bajo condiciones muy generales de borde, pero no se podría decir que aquí tenga la misma superioridad que posee sobre los otros métodos alternantes como la tiene en regiones rectangulares⁽⁴⁾.

B.1. EL ADIP APLICADO A LA ECUACION DE LAPLACE⁽¹⁾

Como se vió en el capítulo I, nuestro modelo matemático lo constituye la ecuación I-5, la cual es una forma modificada de la ecuación de Laplace.

La ecuación de Laplace es resuelta por el ADIP en una forma iterativa, en la que los viejos valores de presión son reemplazados por nuevos valores más refinados sucesivamente. Esto se realiza hasta que converja a la solución para algún valor de exactitud deseado. Ha sido demostrado que este procedimiento requiere más o menos $2 \ln N/N$ operaciones numéricas como mucho para resolver la ecuación de Laplace. Siendo N^2 el número de puntos en el modelo.

Básicamente el ADIP es un proceso de dos pasos que requiere dos ecuaciones a diferencia de la una usual.

Cuando se utiliza el ADIP para resolver la ecuación de Laplace, cada paso de iteración es considerado como un paso de tiempo de un correspondiente estado inestable.

Es decir que el ADIP resuelve la ecuación de estado continuo, como si se tratara de un problema de estado i nestable en cada paso de tiempo.

Luego si consideramos la ecuación II-1

$$\frac{\partial}{\partial x} (Kh \frac{\partial P}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (Kh \frac{\partial P}{\partial y}) - \frac{\mu q}{1.127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi \mu c h}{6.328} \frac{\partial P}{\partial t}$$

El ADIP requerirá como primer paso que una de las derivadas las reemplacemos por su aproximación eb diferencias finitas expresada en función de valores desconocidos de presión, que se hallan a un tiempo $n+1$ mientras que la otra derivada es reemplazada por su aproximación en diferencias finitas expresada en función de los valores de presión conocidos que se hallan en un tiempo n .

El segundo paso es desarrollado en una forma similar, pero esta vez reemplazados los valores desconocidos de presión que se hallan ahora a un tiempo $n+2$ en la deri-

vada cuyos valores se suponían conocidos en el primer -
paso, es decir cambiando las posiciones de las derivadas
con respecto a los valores conocidos y desconocidos de
presión.

Luego, para resolver nuestro modelo matemático hare
mos uso de la ecuación II-3, a dos niveles diferentes de
tiempo. Así tenemos:

$$\begin{aligned} & \frac{(Kh)_{i,j+1/2} (P_{i,j+1} - P_{i,j}) - (Kh)_{i,j-1/2} (P_{i,j} - P_{i,j-1})}{(\Delta x)^2} \quad + \quad n+1 \\ & \frac{(Kh)_{i+1/2,j} (P_{i+1,j} - P_{i,j}) - (Kh)_{i-1/2,j} (P_{i,j} - P_{i-1,j})}{(\Delta y)^2} \quad - \quad n \\ & \frac{\mu q_{i,j}^n}{1.127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi \mu c h (P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n)}{6.328 \Delta t} \quad \text{II-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y & \frac{(Kh)_{i+1/2,j} (P_{i+1,j} - P_{i,j}) - (Kh)_{i-1/2,j} (P_{i,j} - P_{i-1,j})}{(\Delta y)^2} \quad + \quad n+2 \\ & \frac{(Kh)_{i,j+1/2} (P_{i,j+1} - P_{i,j}) - (Kh)_{i,j-1/2} (P_{i,j} - P_{i,j-1})}{(\Delta x)^2} \quad - \quad n+1 \\ & \frac{\mu q_{i,j}^{n+1}}{1.127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi \mu c h (P_{i,j}^{n+2} - P_{i,j}^{n+1})}{6.328 \Delta t} \quad \text{II-5} \end{aligned}$$

Si tenemos que $\Delta x = \Delta y$, multiplicando ambas ecuaciones en sus dos miembros por Δx^2 , y consideramos $\frac{\phi \mu c h}{6.328} \frac{\Delta x^2}{\Delta t} = \gamma$ trasponiendo los términos del segundo miembro al primero, tendremos:

$$\begin{aligned} & \left| (Kh)_{i,j+1/2} P_{i,j+1} - \left[(Kh)_{i,j+1/2} + (Kh)_{i,j-1/2} \right] \gamma P_{i,j} + (Kh)_{i,j-1/2} P_{i,j-1} \right|^{n+1} + \\ & \left| (Kh)_{i+1/2,j} P_{i+1,j} - \left[(Kh)_{i+1/2,j} + (Kh)_{i-1/2,j} \right] \gamma P_{i,j} + (Kh)_{i-1/2,j} P_{i-1,j} \right|^n - \\ & \frac{q_{i,j}^n}{1.127} = 0 \end{aligned} \quad \text{II-6}$$

$$\begin{aligned} & \left| (Kh)_{i+1/2,j} P_{i+1,j} - \left[(Kh)_{i+1/2,j} + (Kh)_{i-1/2,j} \right] \gamma P_{i,j} + (Kh)_{i-1/2,j} P_{i-1,j} \right|^{n+2} \\ & \left| (Kh)_{i,j+1/2} P_{i,j+1} - \left[(Kh)_{i,j+1/2} + (Kh)_{i,j-1/2} \right] \gamma P_{i,j} + (Kh)_{i,j-1/2} P_{i,j-1} \right|^{n+1} - \\ & \frac{q_{i,j}^{n+1}}{1.127} = 0 \end{aligned} \quad \text{II-7}$$

El factor γ es llamado parámetro de interacción (factor para acelerar la convergencia)⁷.

Bajo ciertas condiciones las formas en diferencias finitas sean estas expresadas explícita o implícitamente, son

convergentes. El término convergente nos sirve para dar a entender que la solución exacta de la ecuación en diferencia finita (en ausencia de error de redondeo) tiende a la solución de la ecuación diferencial parcial cuando los incrementos en espacio y tiempo tienden a cero.

Para obtener mayor rapidez de convergencia es necesario usar un ciclo de valores de γ .

Para la ecuación de Laplace en una región cuadrada, la óptima⁽⁸⁾ convergencia ocurre cuando γ está dado por la secuencia de valores:

$$\gamma = 4 \operatorname{Sen}^2 \frac{K \pi}{2 n} \quad (K = 1, 2, 3, \dots, N-1)$$

Donde:

n es el número de incrementos en que se ha dividido el lado del cuadrado.

B. 2. CHEQUEO DE LA CONVERGENCIA

Un chequeo en el progreso del cálculo de la presión puede ser obtenido resolviendo la ecuación II-8 para cada punto en el modelo después de cada interacción.

$$(Kh)_{i,j+1/2} (P_{i,j+1} - P_{i,j}) - (Kh)_{i,j-1/2} (P_{i,j} - P_{i,j-1}) +$$

$$(Kh)_{i+1/2,j} (P_{i+1,j} - P_{i,j}) - (Kh)_{i-1/2,j} (P_{i,j} - P_{i-1,j}) -$$

$$q_{i,j} = \delta$$

II-8

Donde el valor de δ es elevado al cuadrado y acumulado para todos los puntos de la malla. Como la solución correcta requiere que δ sea cero para cada punto en la malla, el procedimiento nos dará una manera conveniente de almacenar el progreso de los cálculos. La computación puede considerársela completa cuando el cambio en la magnitud de este número se convierte en insignificante.

CAPITULO III

ESTRUCTURA Y SOLUCION DE LAS MATRICES RESULTANTES

Para resolver la distribución de presión en el modelo vamos a seguir el procedimiento siguiente⁽¹⁾.

- a) La ecuación II-6 se la escribirá fila por fila en cada punto en el modelo. De esto nos va a resultar un conjunto de ecuaciones simultáneas, las cuales pueden ser arregladas dentro de una matriz tridiagonal, la cual a su vez puede ser resuelta por alguna técnica de eliminación.
- b) Similarmente, luego de haberse completado el cálculo de la presión para todas las filas del modelo, la ecuación II-7 se la escribe columna por columna para cada punto en el modelo. El conjunto de ecuaciones simultáneas resultantes será resuelto para nuevos valores de presión a través del modelo, como en el paso previo. Los valores de presión calculados en el primer paso se convierten en valores conocidos para el segundo paso y viceversa.

Estos dos pasos anteriormente explicados, completan un paso de iteración, y su secuencia de operaciones es repe

tida durante el tiempo necesario para alcanzar la convergencia.

A. ESTRUCTURA DE LAS MATRICES

Escribimos la ecuación II-6 en la forma:

$$(A_j P_{i,j-1} + B_j P_{i,j} + C_j P_{i,j+1})^{n+1} = D_j \quad \text{III-1}$$

Donde:

$$A_j = (Kh)_{i,j-1/2}$$

$$B_j = - (Kh)_{i,j-1/2} + (Kh)_{i,j+1/2} + \gamma$$

$$C_j = (Kh)_{i,j+1/2}$$

$$D_j = q_{i,j}^n - \left| (Kh)_{i-1/2,j} P_{i-1,j} - \gamma \right| (Kh)_{i-1/2,j} + (Kh)_{i+1/2,j} P_{i,j} + (Kh)_{i+1/2,j} P_{i+1,j} \Big| ^n$$

Luego reemplazando la ecuación III-1 para los $n+1$ puntos a lo largo de una fila tendremos un conjunto de ecuaciones simultáneas; así para cualquier fila "i" el sistema será:

$$A_1 P_{i,0} + B_1 P_{i,1} + C_1 P_{i,2} = D_1 \quad \text{III-2}$$

$$A_2 P_{i,1} + B_2 P_{i,2} + C_2 P_{i,3} = D_2$$

$$A_{n+1} P_{i,n} + B_{n+1} P_{i,n+1} + C_{n+1} P_{i,n+2} = D_{n+1}$$

En el cual los términos $A_1 P_{i,0}$ y $C_{n+1} P_{i,n+1}$ son siempre cero (debido a las condiciones de borde).

Luego el sistema de ecuaciones III-2 se reduce a:

$$\begin{aligned}
 B_1 P_{i,1} + C_1 P_{i,2} &= D_1 \\
 A_2 P_{i,1} + B_2 P_{i,2} + C_2 P_{i,3} &= D_2 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 A_{n+1} P_{i,n} + B_{n+1} P_{i,n+1} &= D_{n+1}
 \end{aligned}
 \tag{III-3}$$

Igualmente escribimos la ecuación II-7 en la forma:

$$(A_i P_{i-1,j} + B_i P_{i,j} + C_i P_{i+1,j})^{n+2} = D_i \tag{III-4}$$

Donde:

$$A_i = (Kh)_{i-1/2,j}$$

$$B_i = - (Kh)_{i-1/2,j} + (Kh)_{i+1/2,j} + \gamma$$

$$C_i = (Kh)_{i+1/2,j}$$

$$\begin{aligned}
 D_i = q_{i,j}^{n+1} - & \left| (Kh)_{i,j-1/2} P_{i,j-1} - (Kh)_{i,j-1/2} + (Kh)_{i,j+1/2} - j \right. \\
 & \left. P_{i,j} + (Kh)_{i,j+1/2} P_{i,j+1} \right|^{n+1}
 \end{aligned}$$

Si desarrollamos la ecuación III-4 para los $M+1$ pun

tos a lo largo de una columna, tendremos así mismo otro conjunto de ecuaciones simultáneas; entonces para cualquier columna "j" el sistema será:

$$\begin{aligned}
 A_1 P_{0,j} + B_1 P_{1,j} + C_1 P_{2,j} &= D_1 \\
 A_2 P_{1,j} + B_2 P_{2,j} + C_2 P_{3,j} &= D_2 \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 A_{m+1} P_{m,j} + B_{m+1} P_{m+1,j} + C_{m+1} P_{m+2,j} &= D_{m+1}
 \end{aligned}
 \tag{III-5}$$

En el cual los términos $A_1 P_{0,j}$ y $C_{m+1} P_{m+2,j}$ son siempre ceros (debido a las condiciones de borde).

Luego el sistema de ecuaciones III-5 se reduce a:

$$\begin{aligned}
 B_1 P_{1,j} + C_1 P_{2,j} &= D_1 \\
 A_2 P_{1,j} + B_2 P_{2,j} + C_2 P_{3,j} &= D_2 \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 A_{m+1} P_{m,j} + B_{m+1} P_{m+1,j} &= D_{m+1}
 \end{aligned}
 \tag{III-6}$$

B. SOLUCION DE LOS SISTEMAS DE ECUACIONES

Los sistemas de ecuaciones ⁽⁹⁾ que resultan de las a aproximaciones de las ecuaciones diferenciales parciales,

puede ser resuelto por una variedad de métodos que pueden ser clasificados como directos o iterativos. Los métodos directos son más eficientes que los iterativos cuando el número de ecuaciones es relativamente pequeño. En la mayoría de los casos el uso de un método directo, necesitará que se escriba la matriz de los coeficientes y esto puede representar un gran trabajo si se lo hace manualmente. Un programa de computadora puede ser escrito para que genere las matrices de los coeficientes y constantes usando la ecuación general en diferencias finitas. Una vez que tenemos disponible la matriz de los coeficientes, el método de eliminación de Gauss puede ser utilizado para obtener una solución.

Si el sistema es tridiagonal, no es necesario generar todos los valores en la matriz de los coeficientes y se puede utilizar una variación del método de eliminación de Gauss, al cual se lo denomina método de Thomas.

Al aplicarse el método de eliminación de Gauss, para resolver un sistema de n ecuaciones con n valores desconocidos, este requerirá aproximadamente $n^3/3$ multiplicaciones además de otras operaciones aritméticas.

Por otra parte si el sistema de ecuaciones es tridiagonal, usando el método de Thomas para resolver igual número de ecuaciones, requerirá como máximo $5n$ multiplicaciones y $3n$ sumas. Para este caso de tener un sistema tridiagonal, un método iterativo necesitará más tiempo de multiplicación y de sumas que el método de Thomas.

B.1. APLICACION DEL METODO DE THOMAS

El sistema de ecuaciones III-3 puede ser resuelto usando las siguientes relaciones del método de Thomas:

$$P_{i,n+1} = g_{n+1}$$

$$P_{i,j} = g_j - \frac{C_j P_{i,j+1}}{w_j} \quad (1 < j < n)$$

Donde:

$$w_1 = B_1$$

$$w_j = B_j - \frac{A_j C_{j-1}}{w_{j-1}} \quad (2 < j < n+1)$$

$$g_1 = \frac{D_1}{w_1}$$

$$g_j = \frac{D_j - A_j g_{j-1}}{w_j} \quad (2 < j < n+1)$$

De la misma manera, el sistema de ecuaciones III-6 puede ser resuelto, usando:

$$P_{m+1,j} = g_{m+1}$$

$$P_{i,j} = g_i - \frac{C_i P_{i+1,j}}{w_i} \quad (1 < i < m)$$

Donde:

$$w_1 = B_1$$

$$w_i = B_i - \frac{A_i C_{i-1}}{w_{i-1}} \quad (2 < i < m+1)$$

$$g_1 = \frac{D_1}{w_1}$$

$$g_i = \frac{D_i - A_i g_{i-1}}{w_i} \quad (2 < i < m+1)$$

Las relaciones usadas en las soluciones de los sistemas tridiagonal es III-3 y III-6 se las encuentra de mostradas en el Apéndice F.

CAPITULO IV

PROGRAMA DE COMPUTADORA

A. PROCESO DEL PROGRAMA

El programa de computadora que nos ha servido para realizar primeramente los cálculos de las presiones y luego la determinación de las distintas posiciones del frente, los hemos dividido en cuatro subprogramas, debido a razones técnicas, y los hemos denominado: Programa N° 1, Programa N° 2, Programa N° 3, Programa N° 4.

PROGRAMA N° 1

Este programa nos permite grabar en un disco magnético los datos de permeabilidad - espesor y de ratas de flujo, en las direcciones x e y , para cada nodo de la malla. Los datos proporcionados al programa son:

N = Número de intervalos en dirección x .

M = Número de intervalos en dirección y .

K_{HH} = Permeabilidad-espesor en dirección x .

K_{HV} = Permeabilidad-espesor en dirección y .

Q = Rata de flujo en dirección x

Q = Rata de flujo en dirección y

PROGRAMA N° 2

Este programa, nos permite hacer un cálculo de las presiones sucesivamente hasta alcanzar el estado continuo. Utiliza como datos los valores grabados por el programa anterior y:

N = Número de intervalos en dirección x.

M = Número de intervalos en dirección y.

DX = Longitud de los intervalos en la dirección x.

DY = Longitud de los intervalos en la dirección y.

VIS = Viscosidad del fluido desplazante.

Los valores de presión calculados para cada nodo en el momento de alcanzar el estado continuo son grabados en un disco magnético.

PROGRAMA N° 3

Este programa nos permite escribir las características del modelo (incluidos los datos de permeabilidad-espesor grabados por el primer programa) y además los valores de presión calculados para cada nodo en el momento de alcanzar el estado continuo grabados por el Programa N° 2.

Utiliza además de los datos de permeabilidad-espesor

y de presiones estabilizadas, los valores:

N = Número de intervalos en dirección x.

M = Número de intervalos en dirección y.

DELTX = Longitud de los intervalos, tanto en dirección x como en dirección y.

VIS = Viscosidad del fluido desplazante

POR = Porosidad de la formación

SOD = Saturación de aceite desplazable

Q = Ratas de flujo

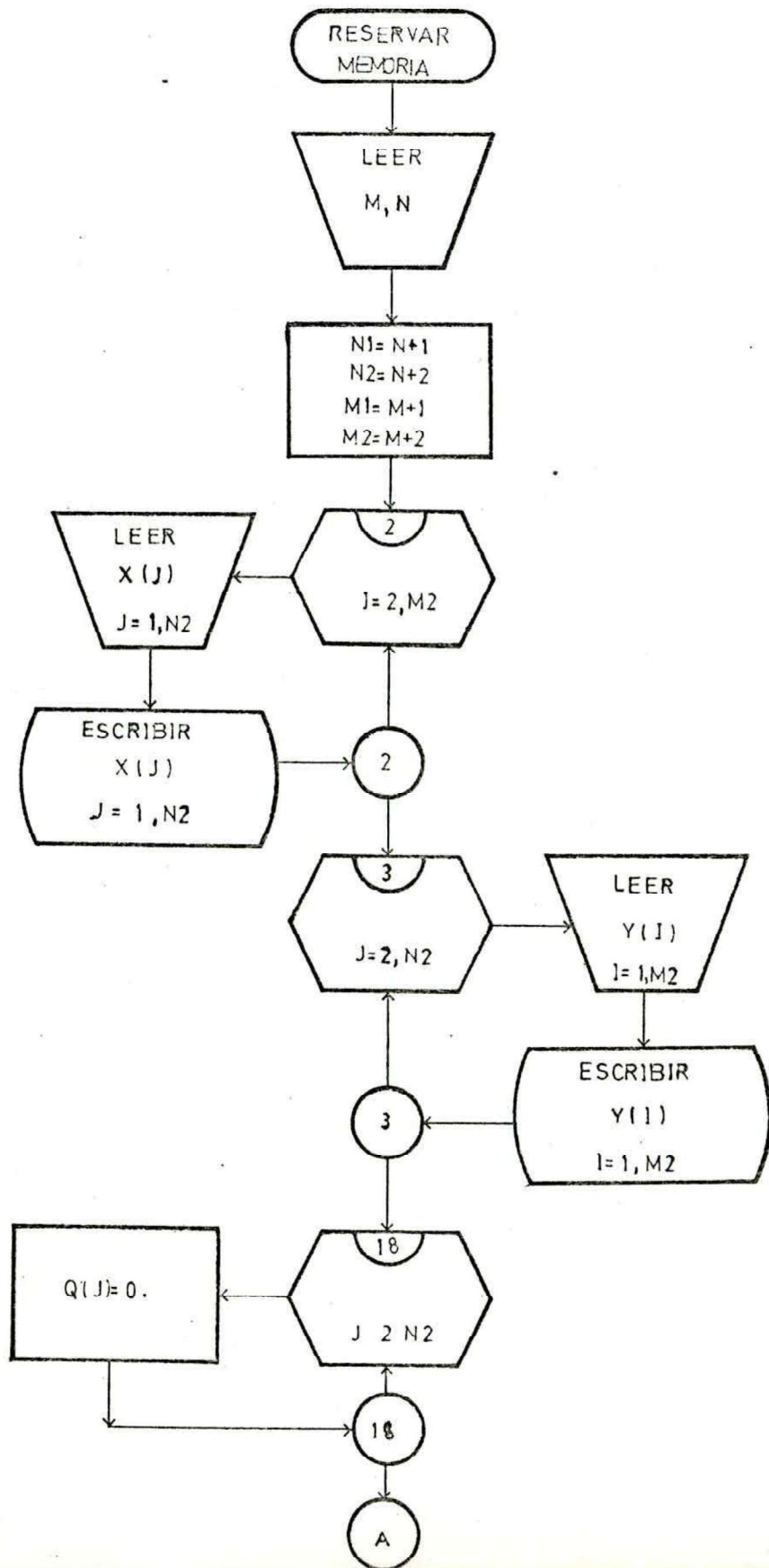
H = Espesor de la formación

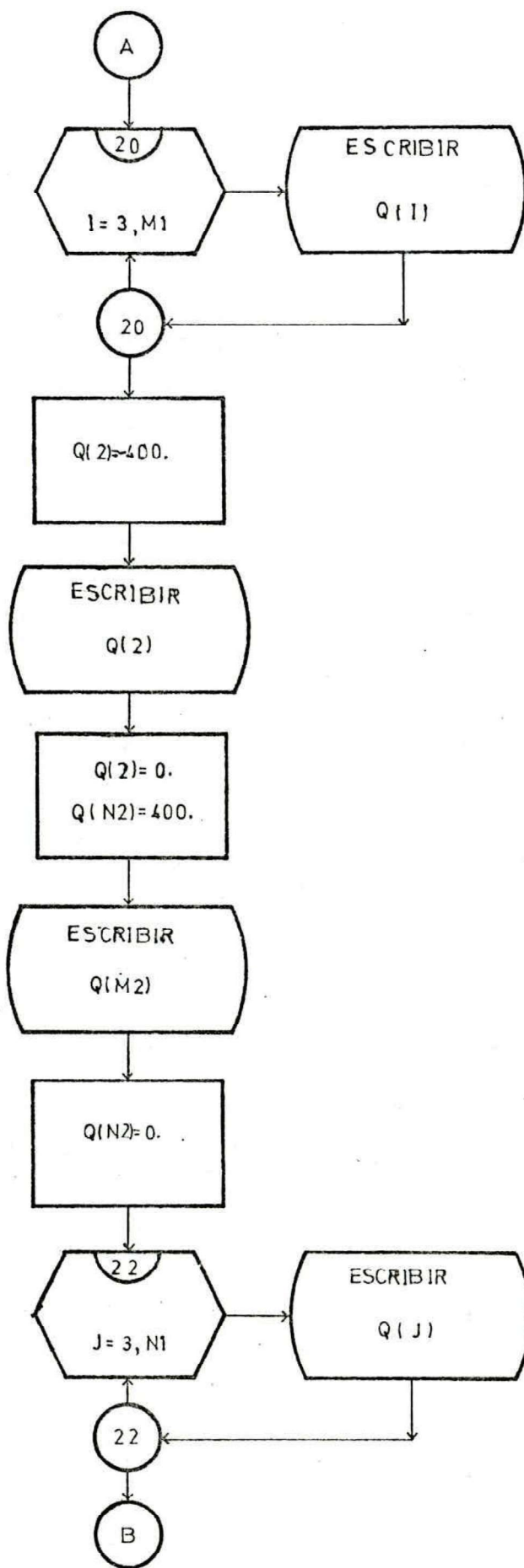
PROGRAMA N°4

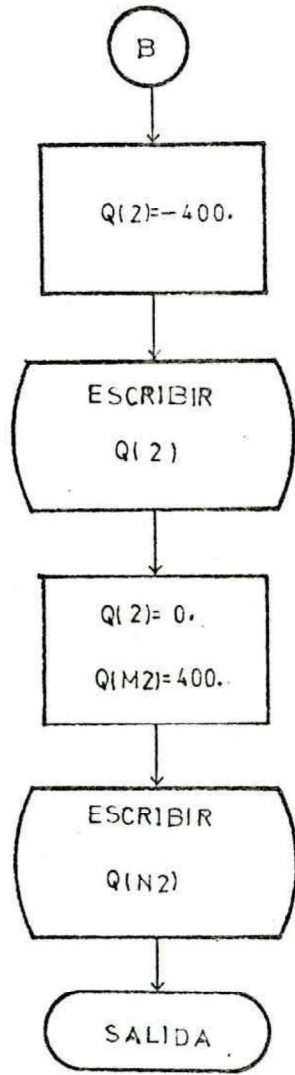
Este programa nos permite calcular las diferentes posiciones del frente de invasión hasta el momento en que se produce la ruptura. Utiliza los mismos datos que el Programa N° 3.

PROGRAMA N° 1

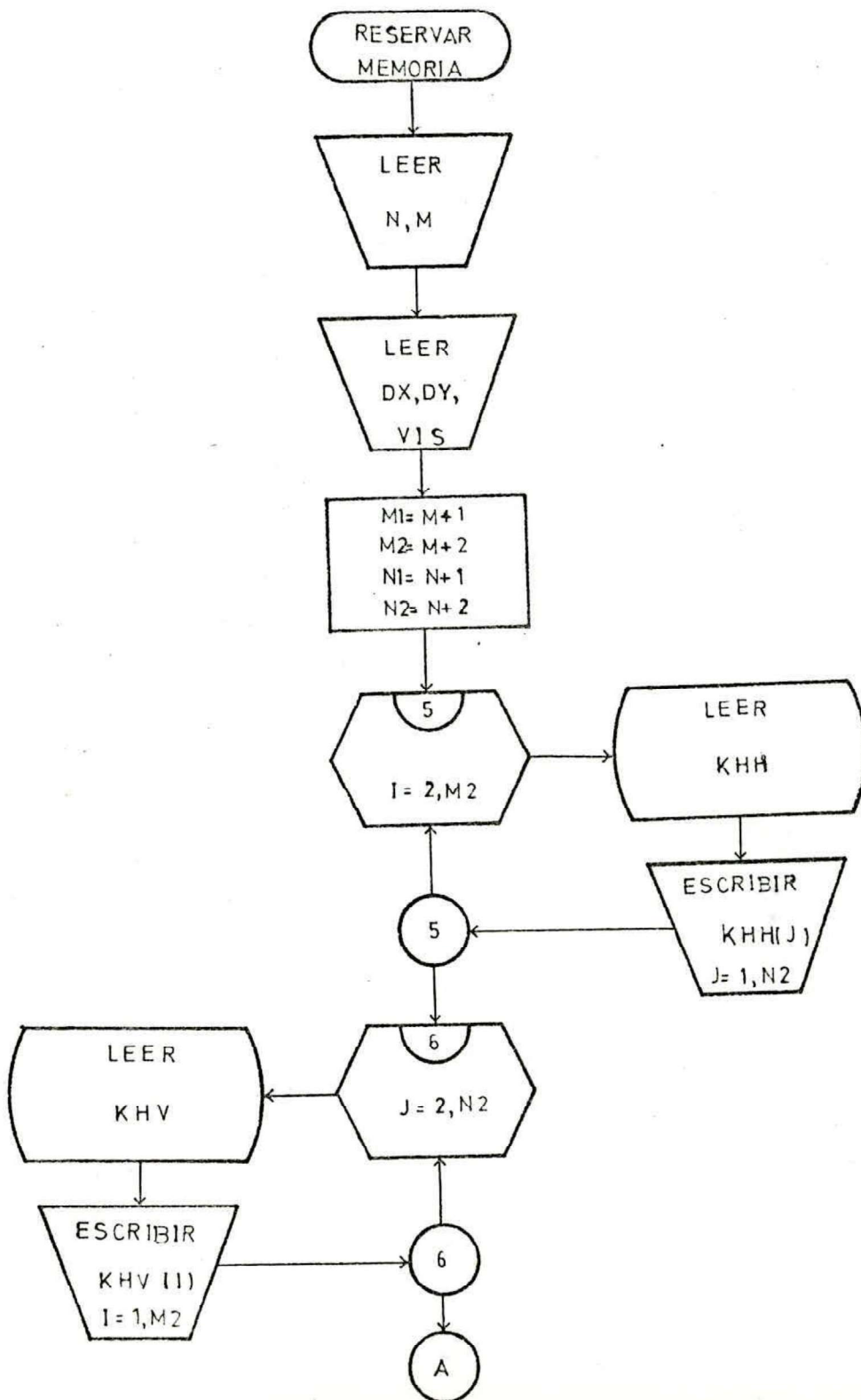
47

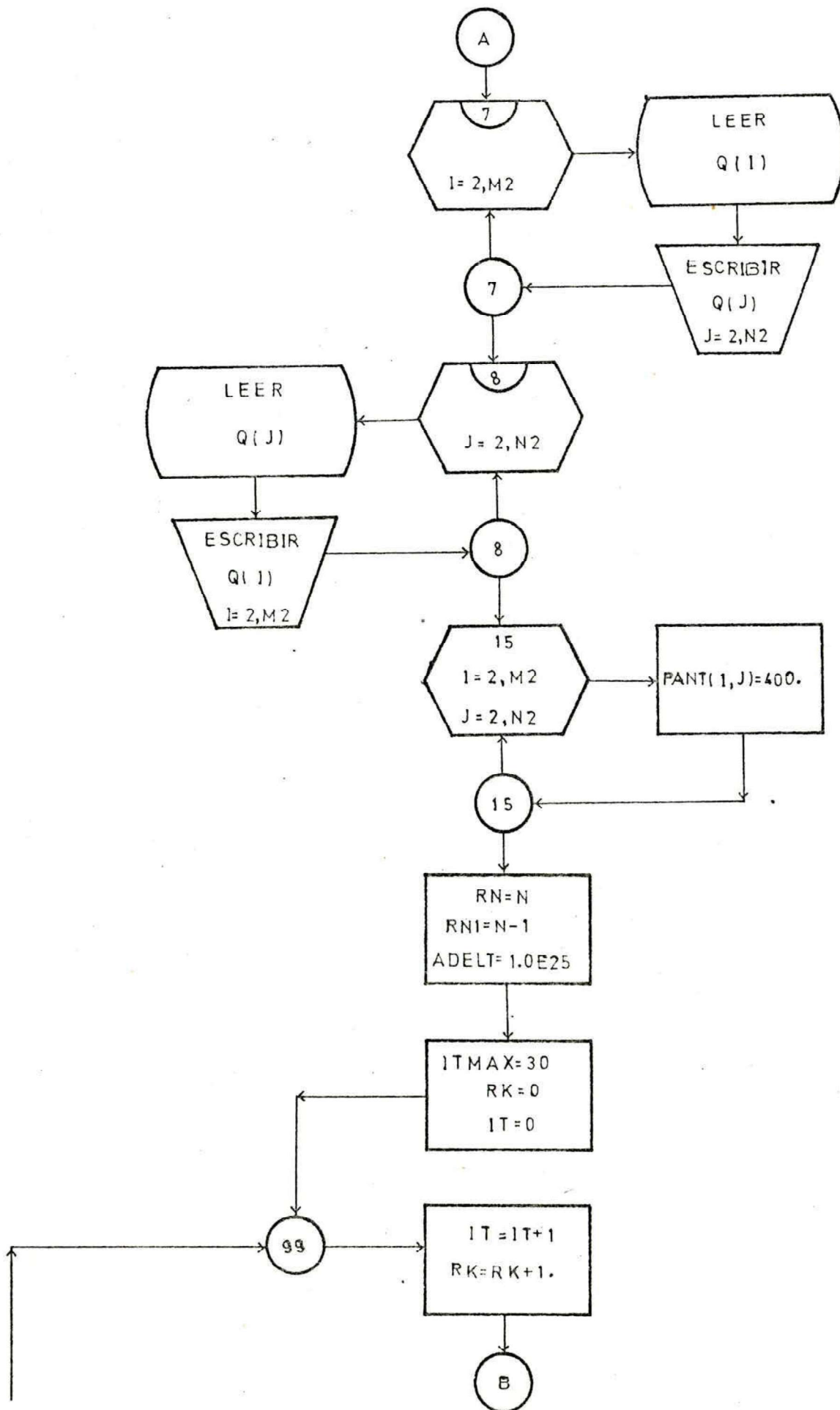


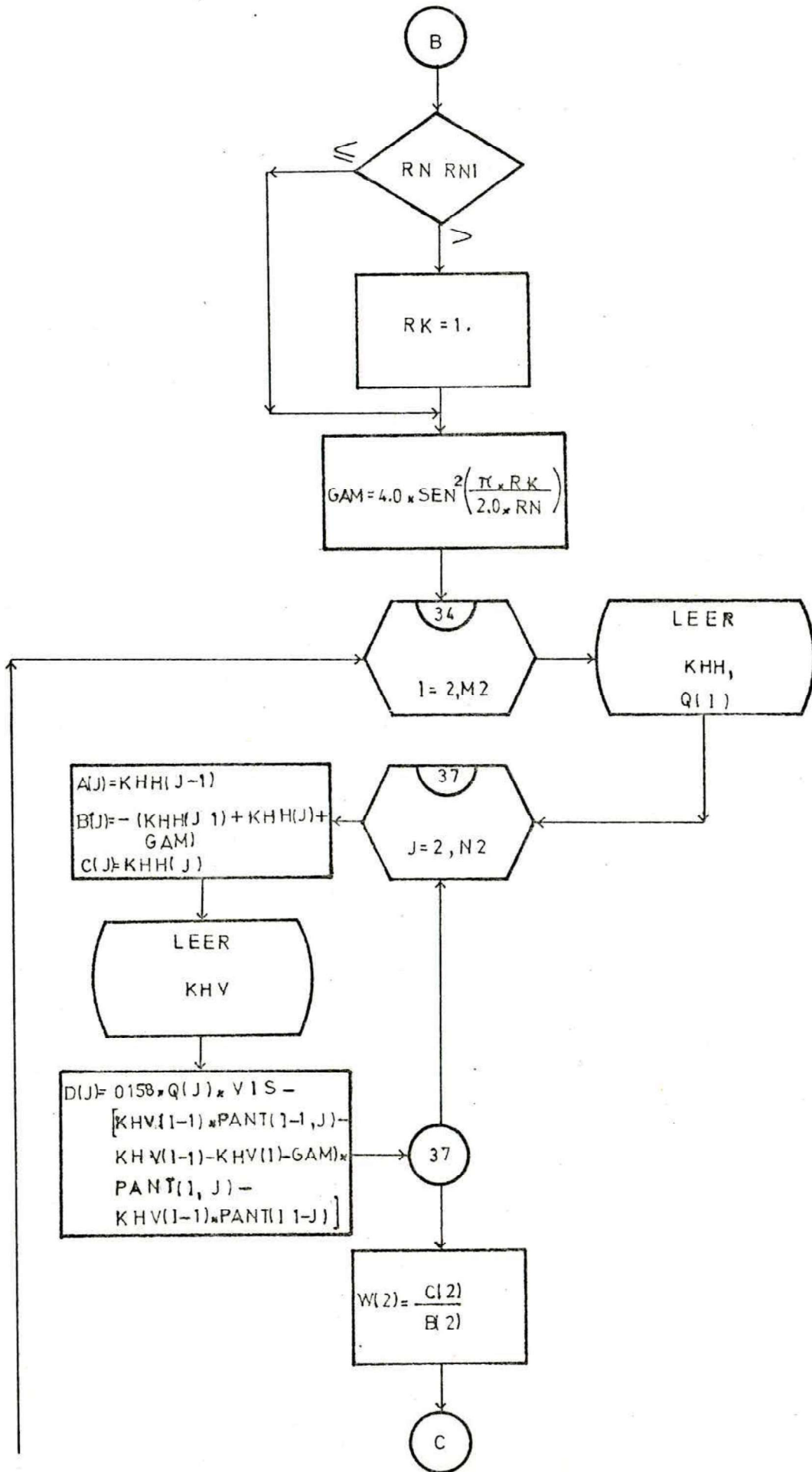


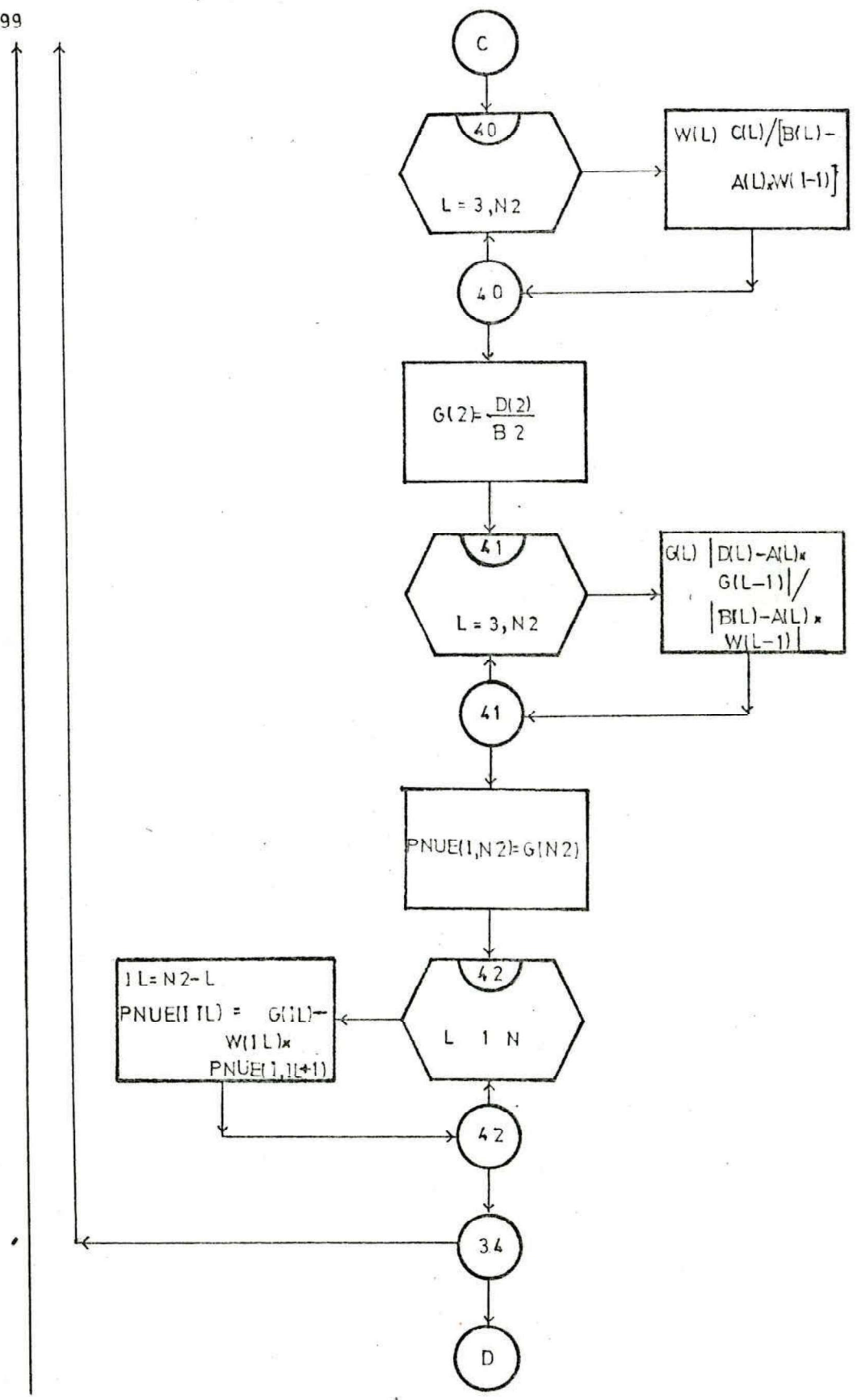


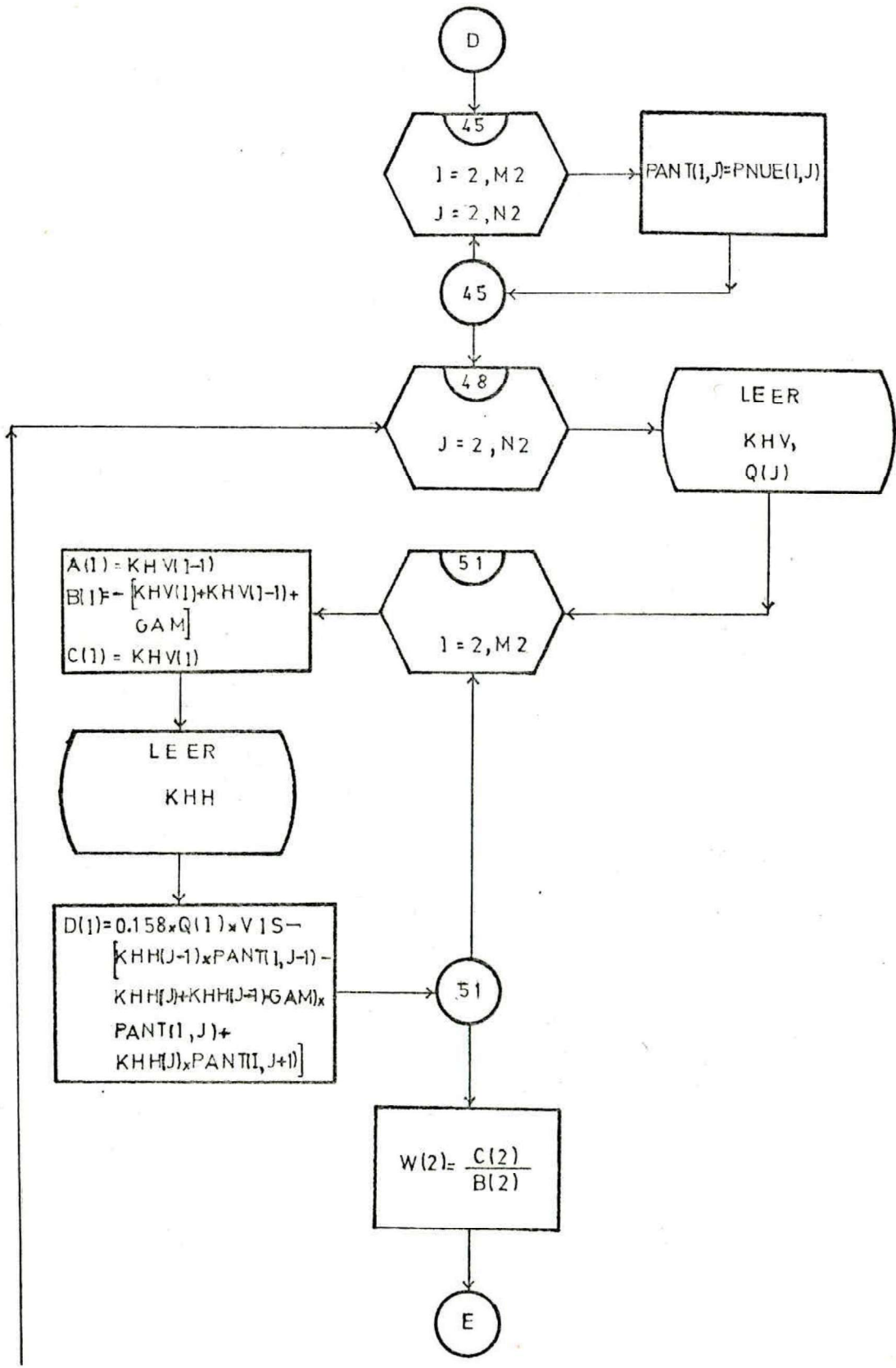
PROGRAMA N^o 2











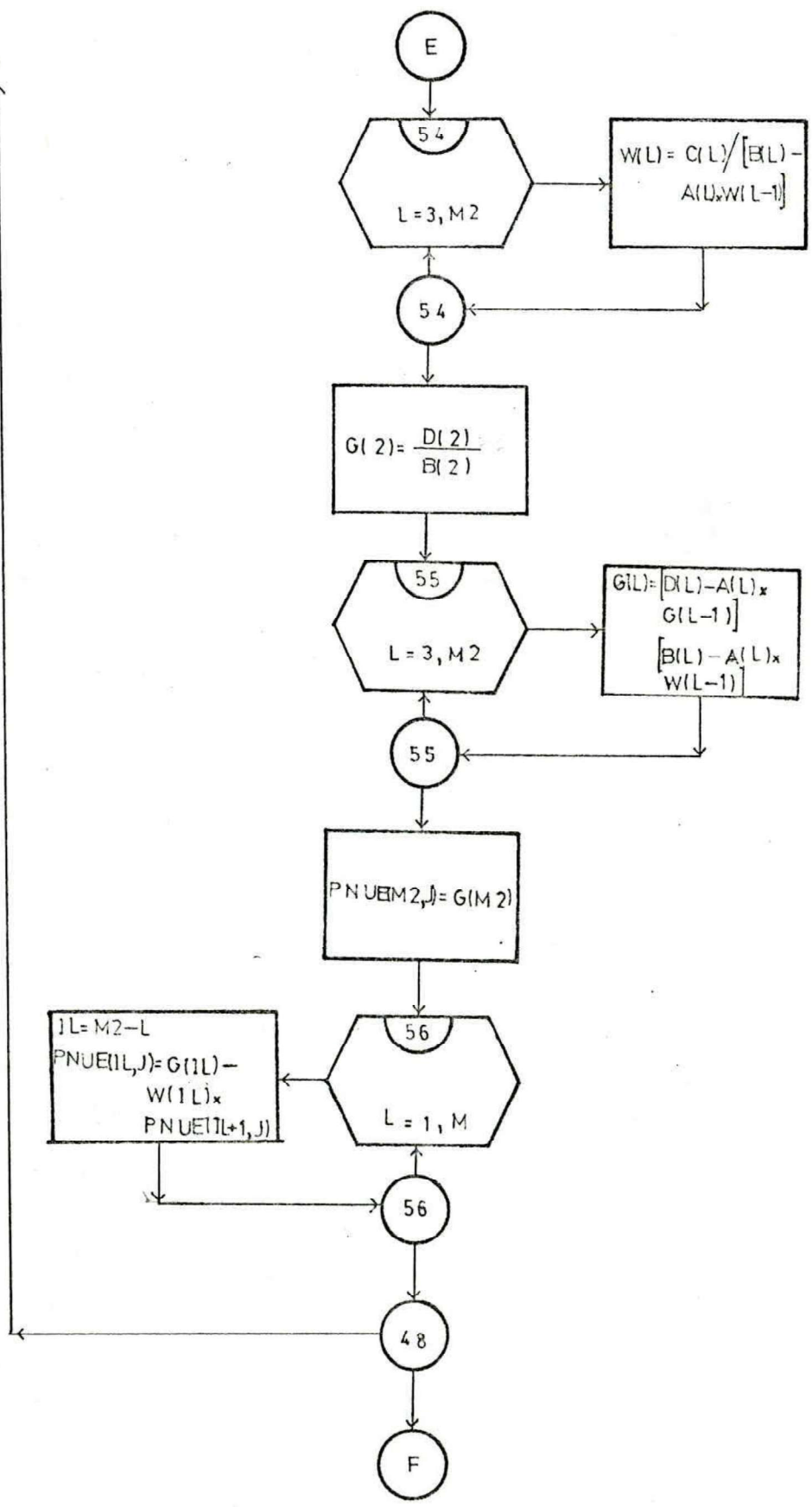
$A(I) = KHV(I-1)$
 $B(I) = [KHV(I) + KHV(I-1) + GAM]$
 $C(I) = KHV(I)$

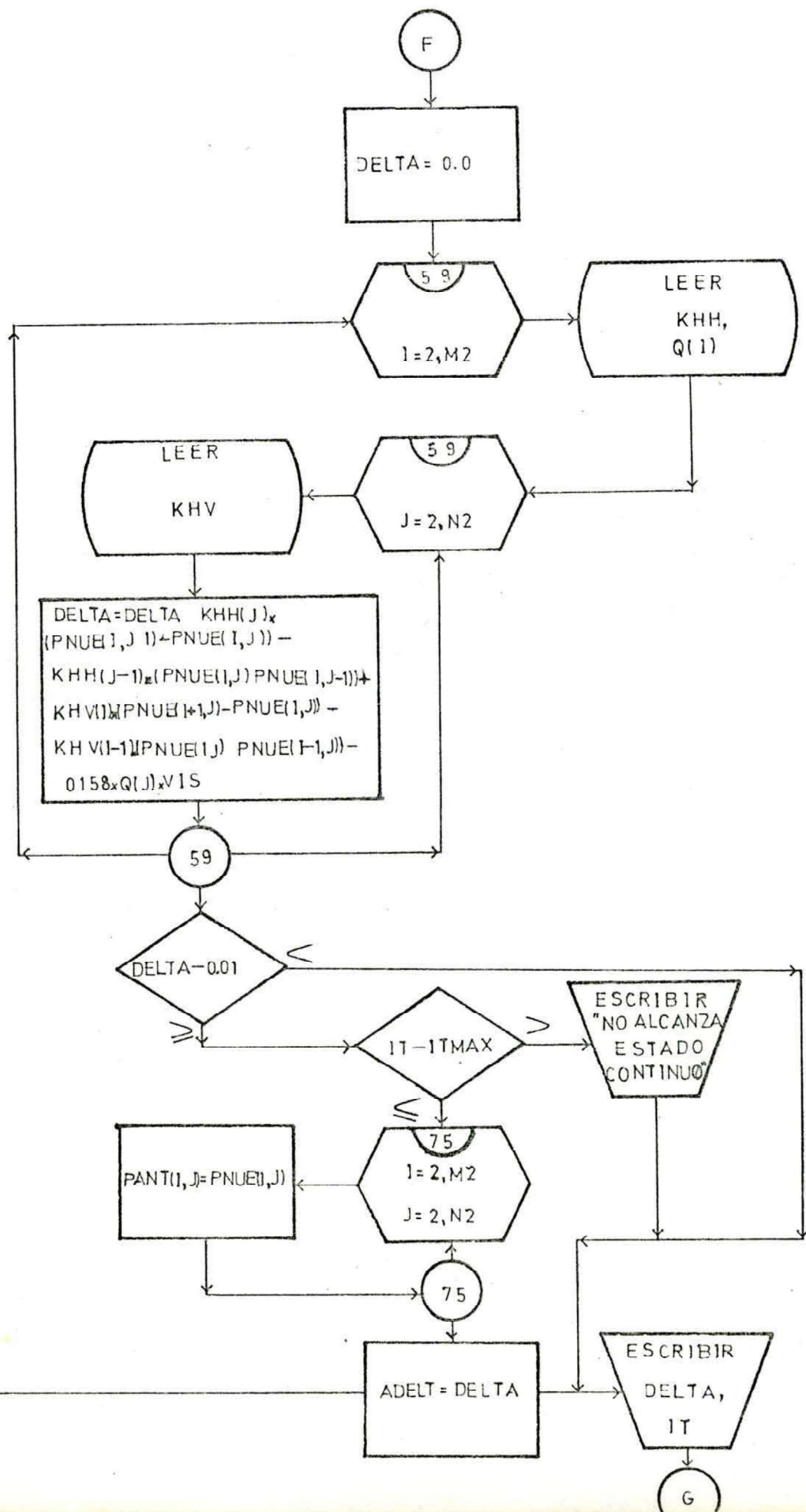
LEER
 KHH

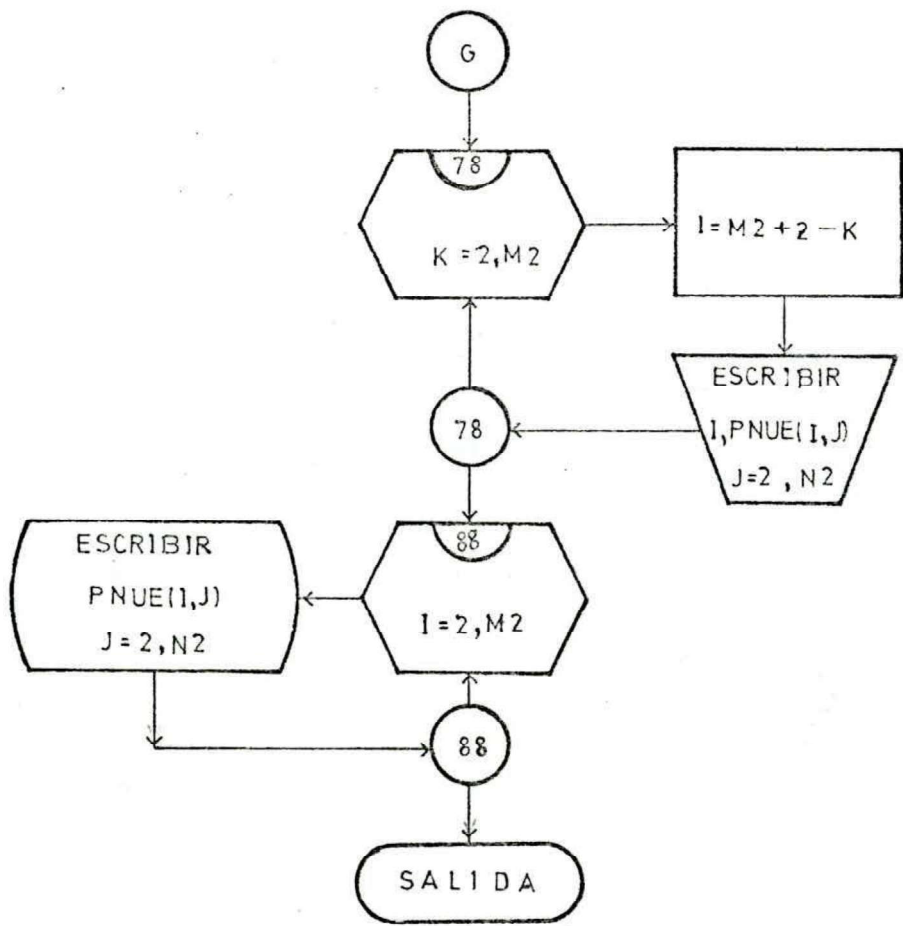
$D(I) = 0.158 * Q(I) * VIS -$
 $[KHH(J-1) * PANT(I, J-1) -$
 $KHH(J) + KHH(J-1) * GAM] *$
 $PANT(I, J) +$
 $KHH(J) * PANT(I, J+1)]$

$W(2) = \frac{C(2)}{B(2)}$

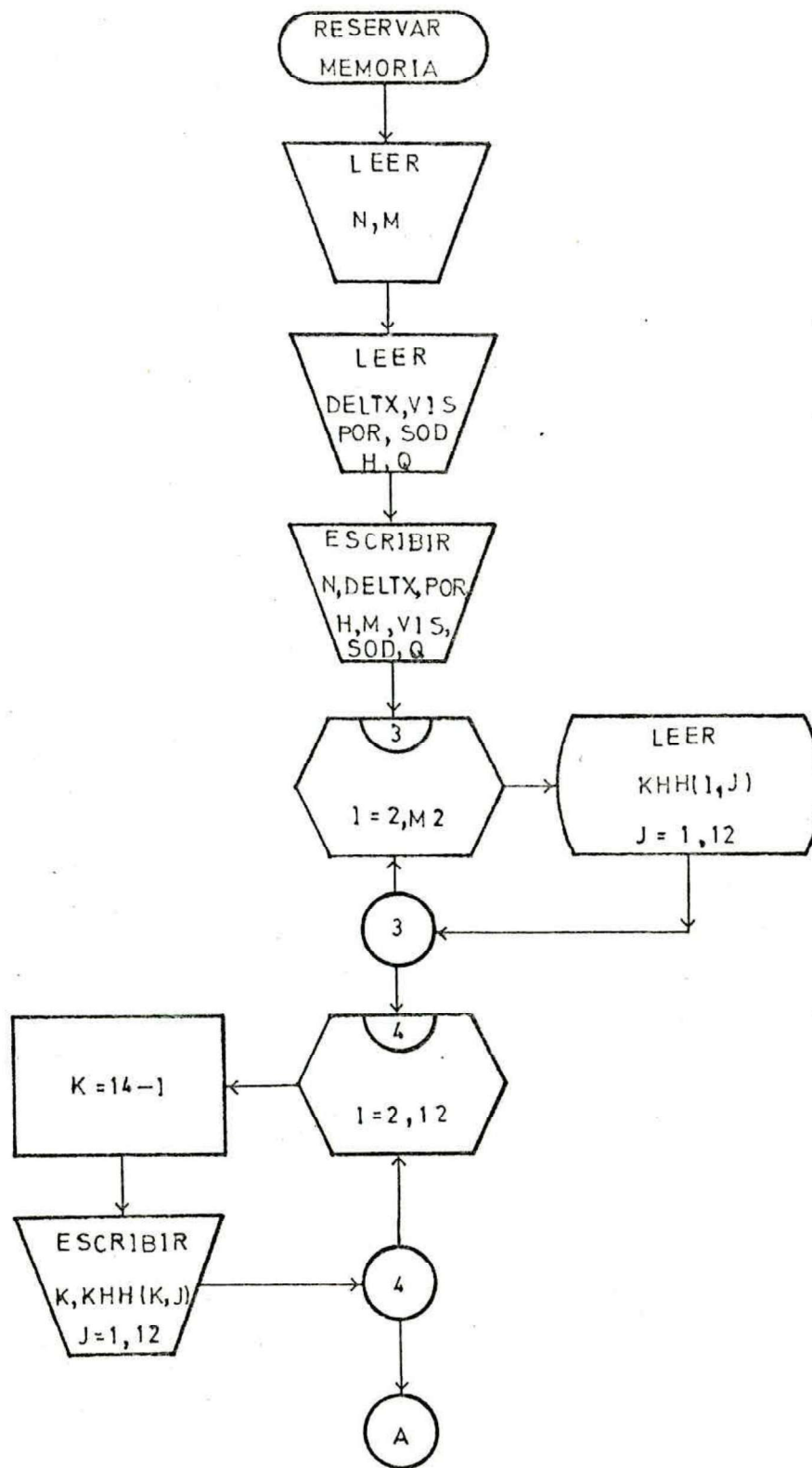
99

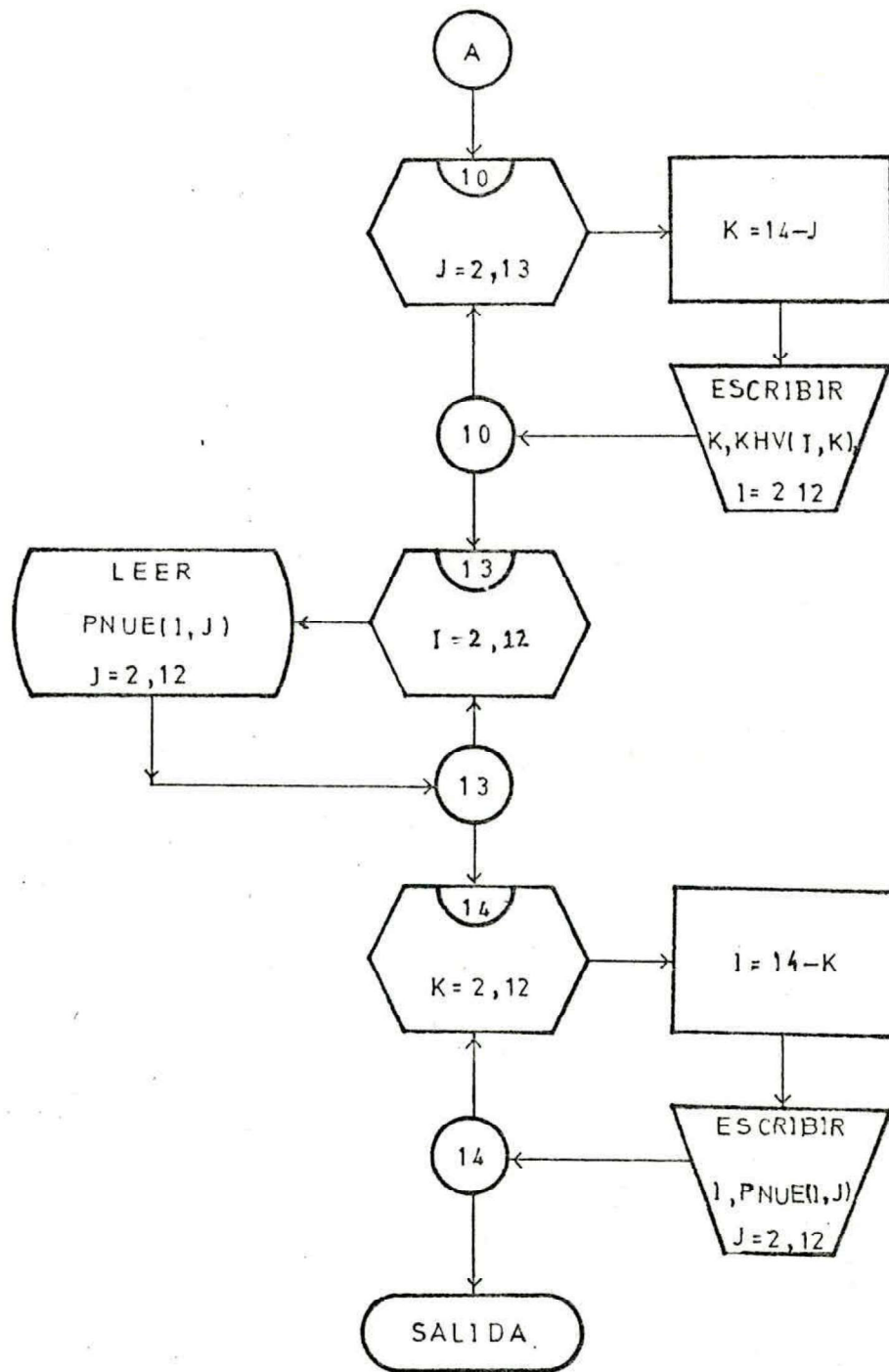


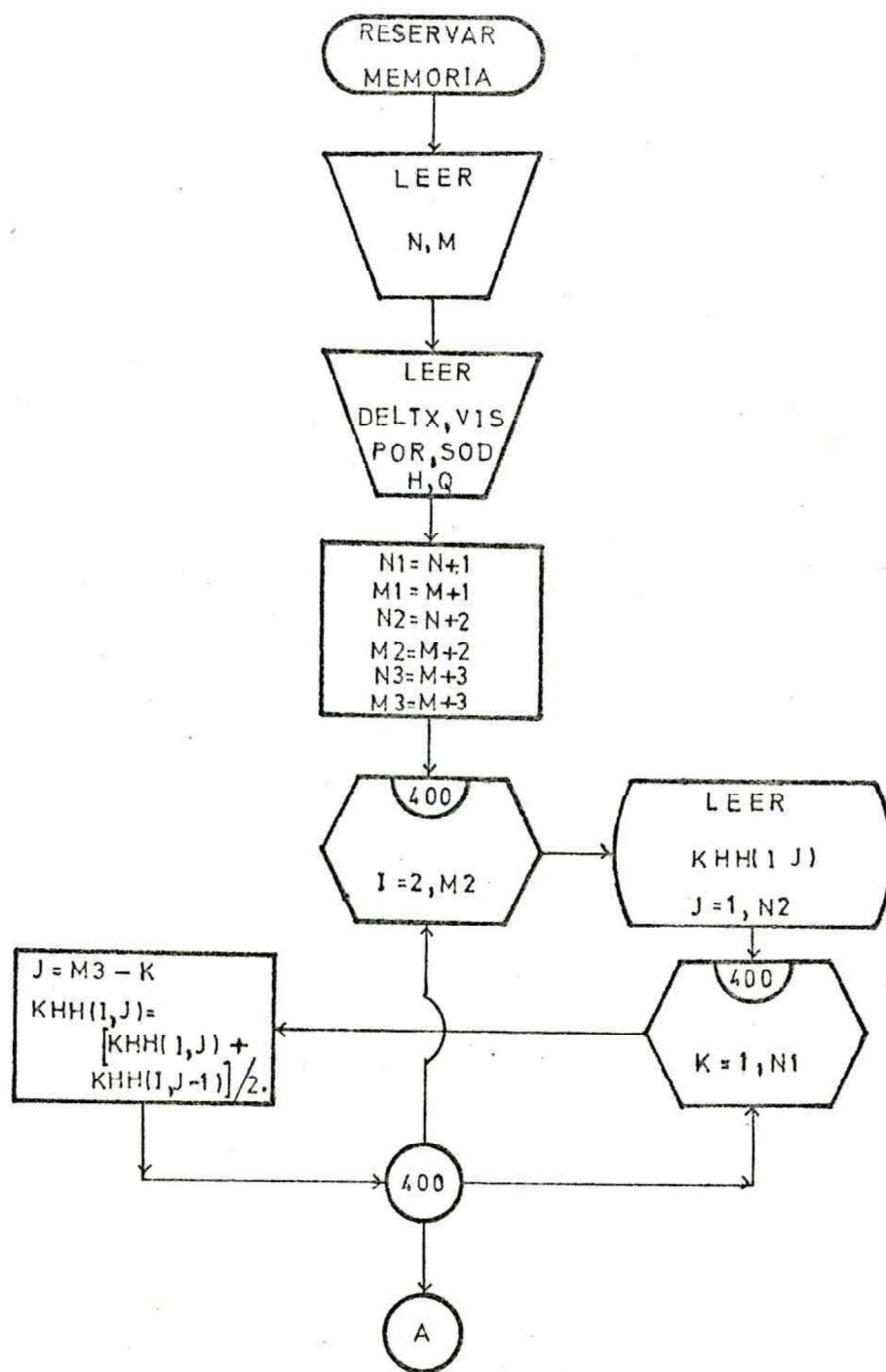


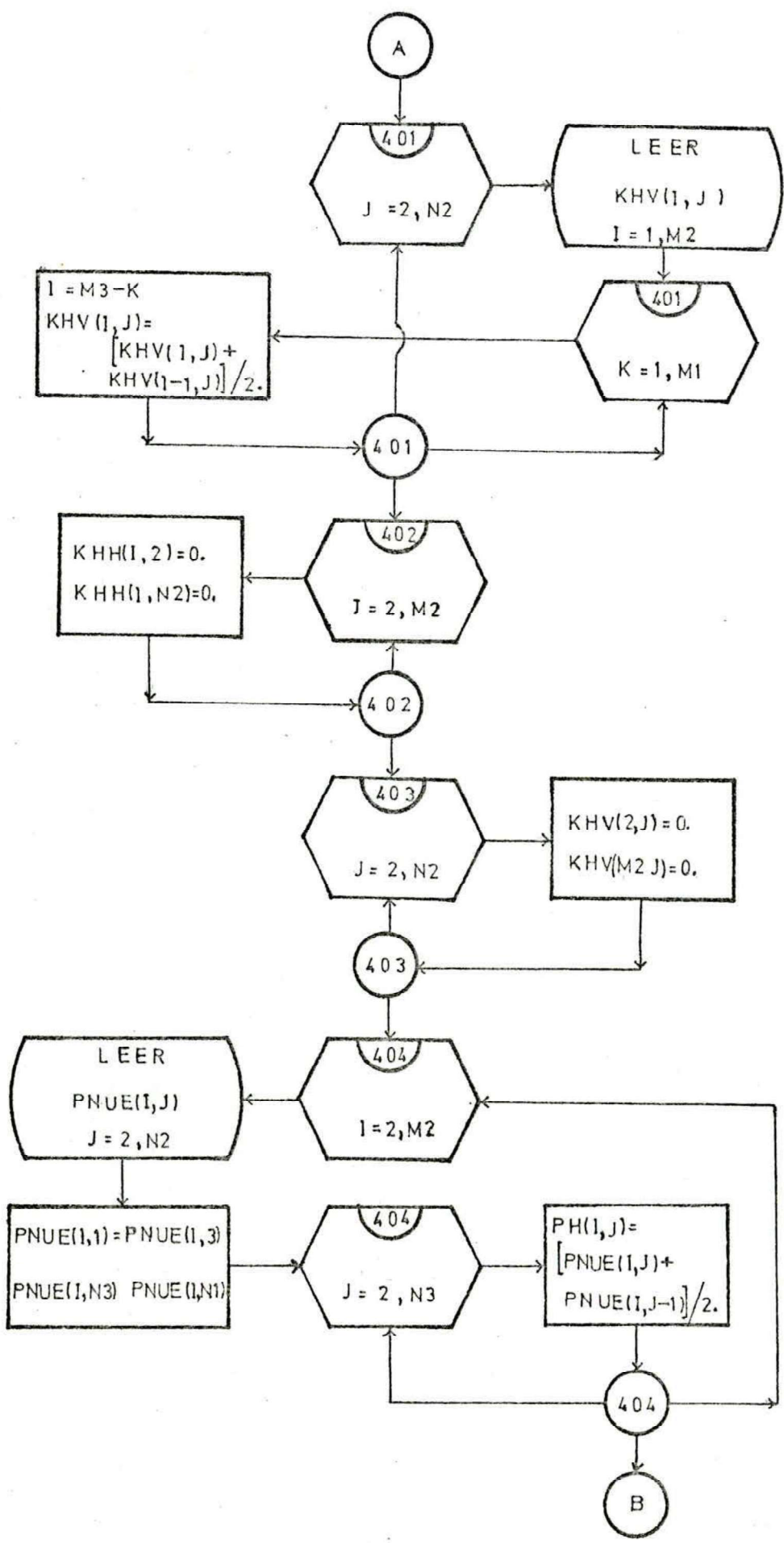


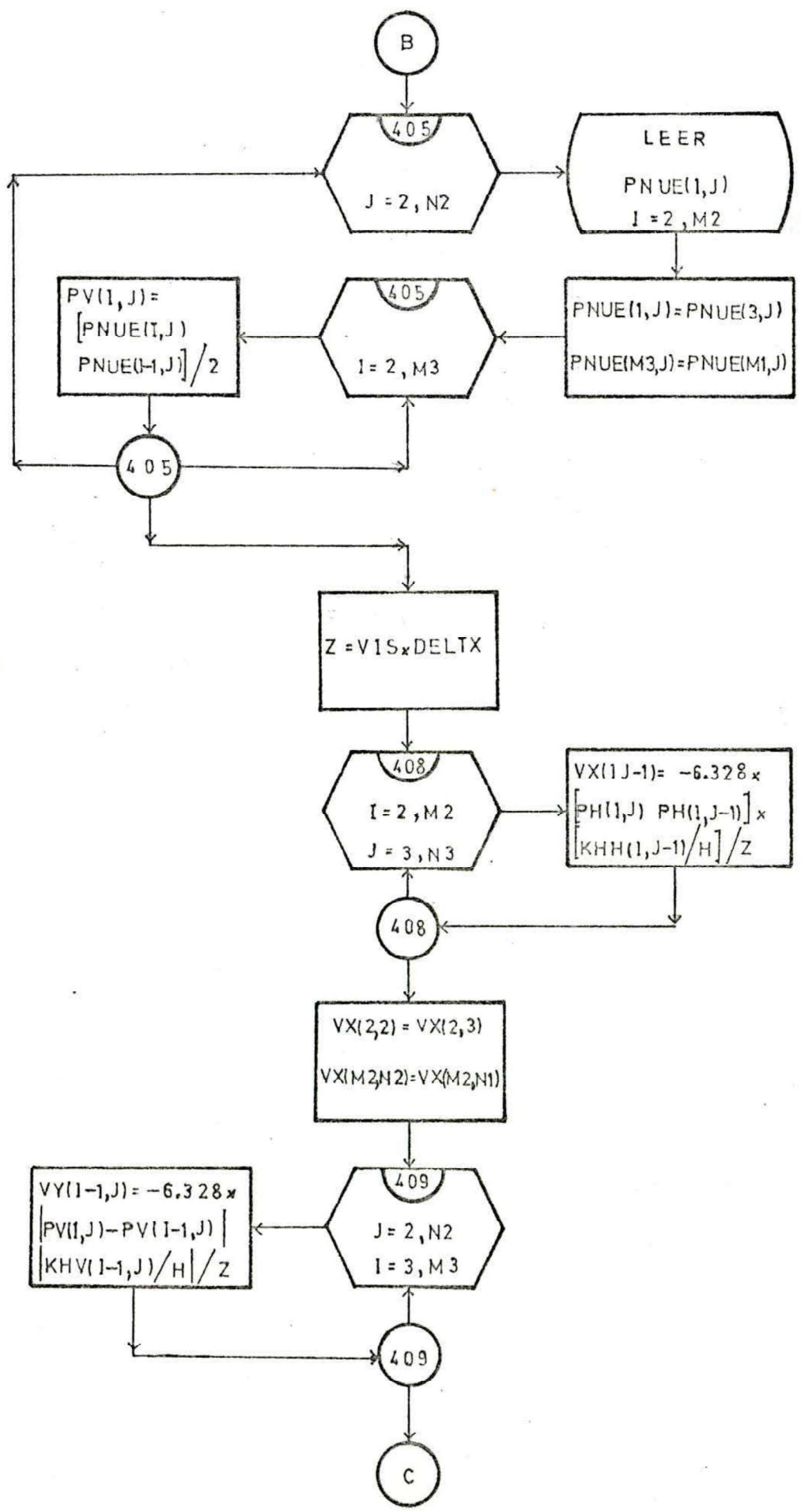
PROGRAMA N^o3

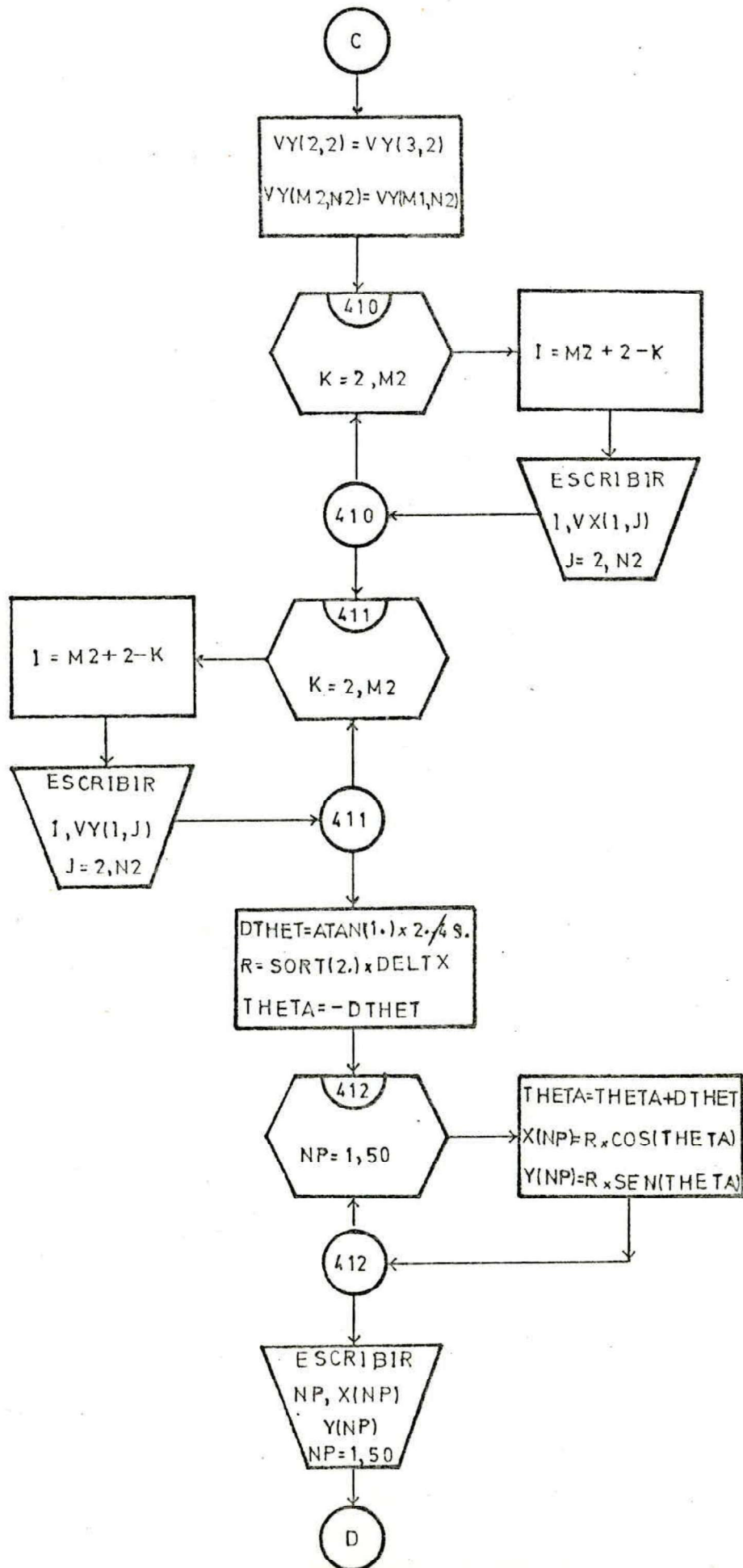


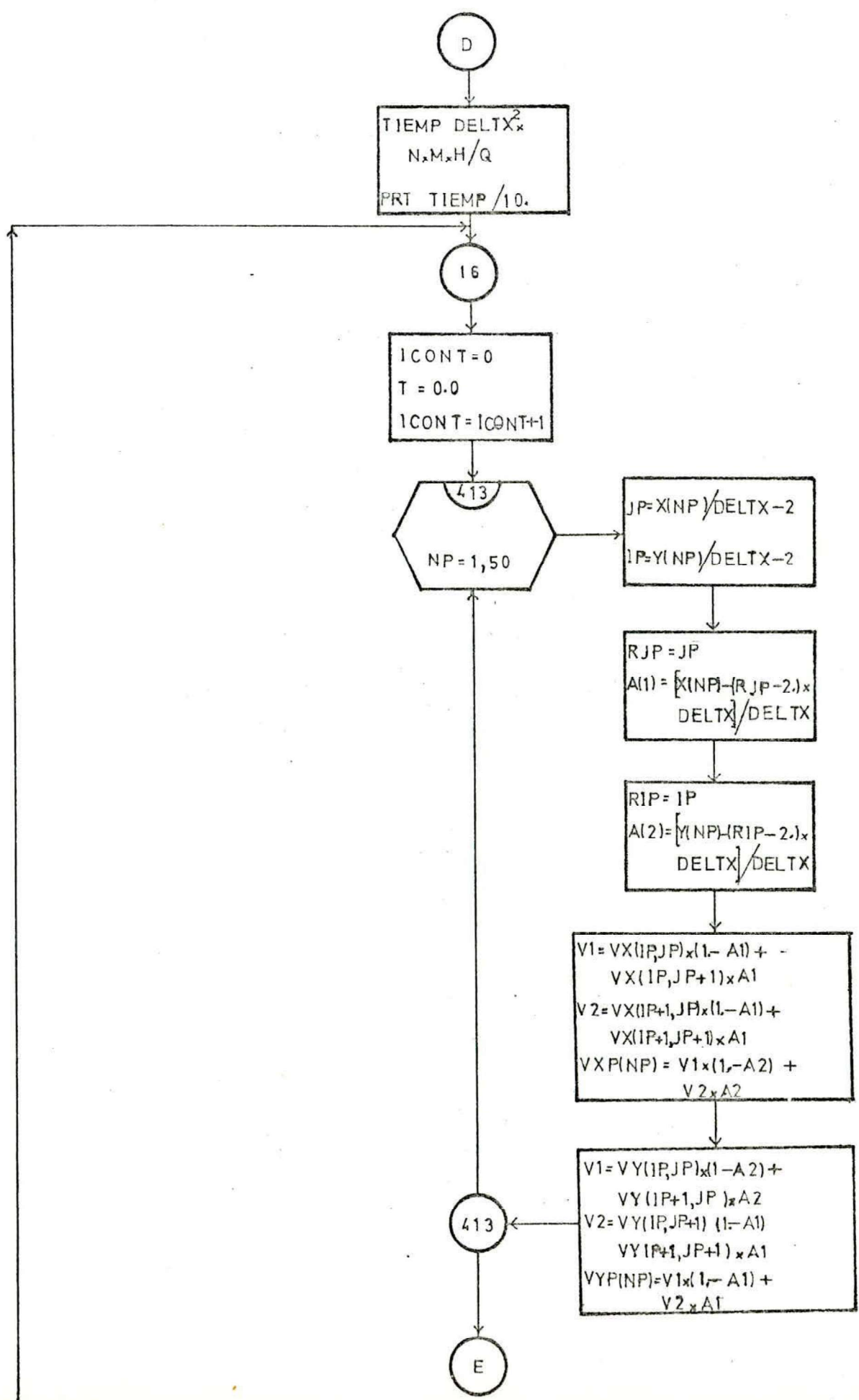


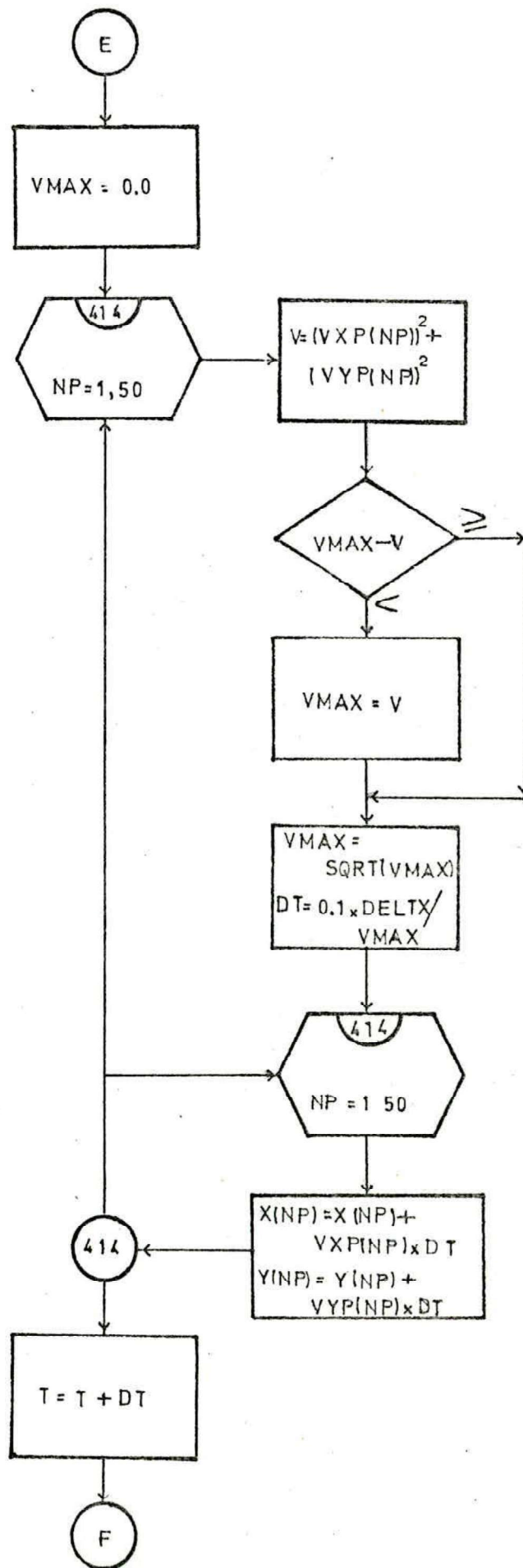
PROGRAMA N^o4

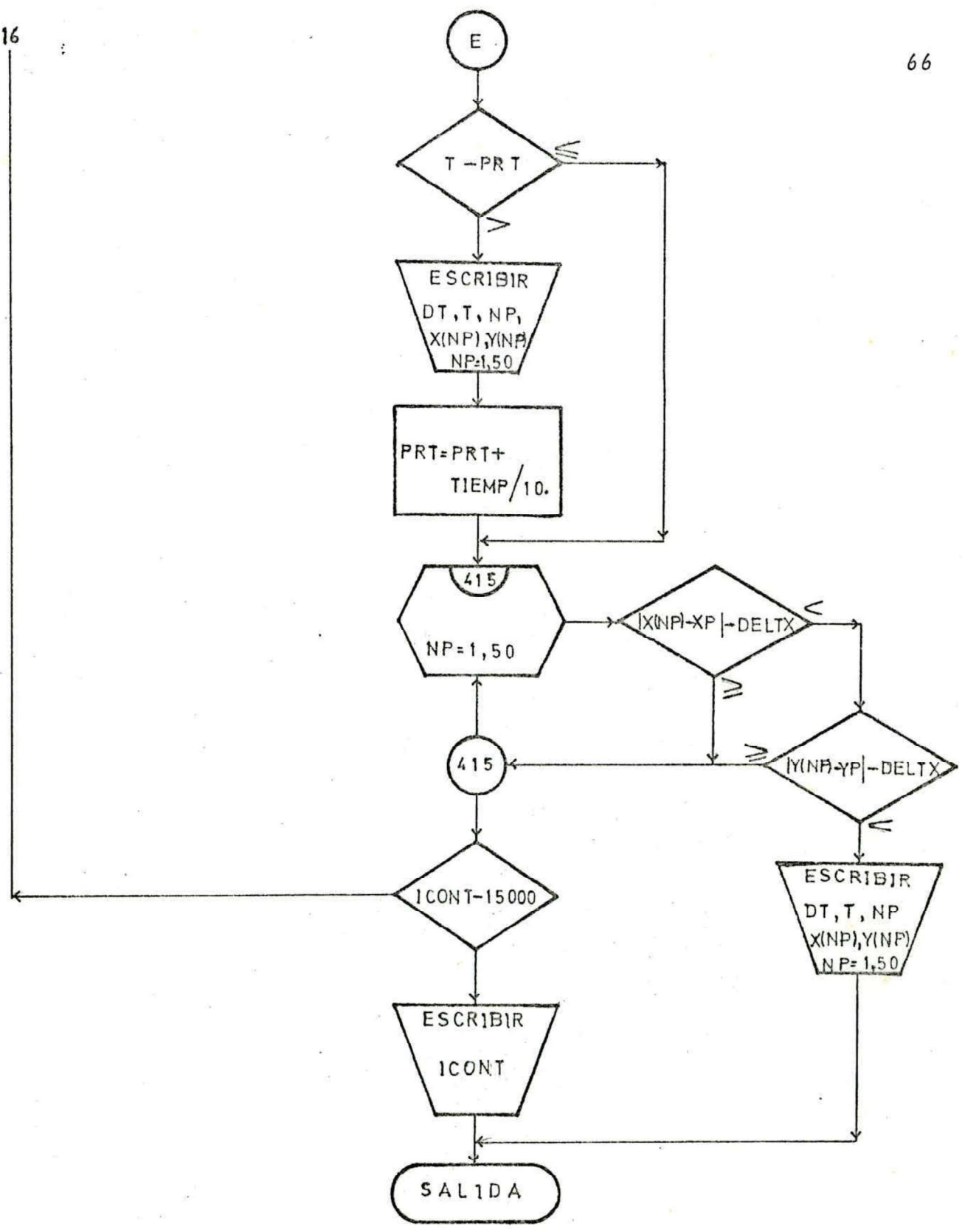












```

// JOB
LOG DRIVE   CART SPEC   CART AVAIL   PHY DRIVE
0000        0001        0000        0000

V2 M10      ACTUAL 8K   CONFIG 8K
// OJJP

*DELFTE      FIC01
CART ID 0001  DR ADDR 3880  DR CNT  0060

*DELFTE      FIC02
CART ID 0001  DB ADDR 3880  DB CNT  0060

*DELFTE      FIC03
CART ID 0001  DR ADDR 3880  DR CNT  0060

*DELFTE      FIC04
D 26 NAME NOT FOUND IN LET/ELET

*STOREDATA  WS UA FIC01 0006
CART ID 0001  DR ADDR 3880  DR CNT  0060

*STOREDATA  WS UA FIC02 0006
CART ID 0001  DR ADDR 3810  DR CNT  0060

*STOREDATA  WS UA FIC03 0006
CART ID 0001  DR ADDR 3870  DB CNT  0060

*STOREDATA  WS UA FIC04 0006
CART ID 0001  DR ADDR 3800  DR CNT  0060

// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
*EXTENDED PRECISION
*IOCS(DISK,CARD,1132 PRINTER)
C
C   RAFAEL MUNFZ SATURNO   INGENIERIA DE PETROLEOS
C
C   ESTE PROGRAMA PARA LOS DATOS DE PERMEABILIDAD-ESPESOR Y RATAS
C   DE FLUJO EN CADA NODO EN LAS DIRECCIONES X E Y
C   VECTOR X IGUAL A PERMEABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO X
C   VECTOR Y IGUAL A PERMEABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO Y
C   O IGUAL A FLUJOS EN LOS NODOS
C   FILE 111=KHH
C   FILE 222=KHY
C   FILE 333=O ALMACENADOS EN LA DIRECCION X
C   FILE 444=O ALMACENADOS EN LA DIRECCION Y
C
DIMENSION Y(22),V(22),O(22)
DEFINE FILE 111(22,66,U,KHY)
DEFINE FILE 222(22,66,U,KHY)
DEFINE FILE 333(22,66,U,IOX),444(22,66,U,IOY)
READ(2,5)M,N
5 FORMAT(2I5)

```

PAGE 2

```

N1=N+1
N2=N+2
M1=M+1
M2=M+2
DO 2 I=2,M2
  READ(2,1)(X(J),J=1,N2)
  1 FORMAT(12F5.2)
  2 WRITE(1,1)(X(J),J=1,N2)
  DO 3 J=2,N2
    READ(2,1)(Y(I),I=1,M2)
    3 WRITE(2,2)(Y(I),I=1,M2)
  DO 18 J=2,N2
    18 C(J)=0.0
  DO 20 I=1,M1
    20 WRITE(2,1)Q
    C(2)=-400.
    WRITE(3,3)P2)Q
    C(2)=0.0
    C(N2)=400.
    WRITE(3,3)M2)Q
    C(N2)=0.
  DO 22 J=1,N1
    22 WRITE(4,4)J)Q
    C(2)=-400.
    WRITE(4,4)P2)Q
    C(2)=0.
    C(M2)=400.
    WRITE(4,4)N2)Q
  CALL EXIT
  END

```

FEATURES SUPPORTED
 ONE WORD INTEGERS
 EXTENDED PRECISION
 TOCS

CODE REQUIREMENTS FOR
 COMMON 0 VARIABLES 240 PROGRAM 332
 END OF COMPILATION

PAGE 1

// JOB

LOG DRIVE : CART SPEC CART AVAIL PHY DRIVE
0000 0004 0004 0000

V2 M10 ACTUAL BK CONFIG BK

// FOR

* ONE WORD INTEGERS

* LIST SOURCE PROGRAM

* EXTENDED PRECISION

* IORS(DISK,CARD,1132 PRINTER)

C RAFAEL NUNEZ SATURNO INGENIERIA DE PETROLEOS

C ESTE PROGRAMA CALCULA LAS NUEVAS PRESIONES EN CADA PUNTO DEL

C MODELO, HASTA QUE ESTE ALCANZA EL ESTADO CONTINUO, Y UNA VEZ

C ALCANZADO ESTE, NOS ESCRIBE LOS VALORES DE ESTAS PRESIONES

C ESTABILIZADAS

C FILE RESERVESTONES

C REAL KMH(22), KHV(22)

C DIMENSION DANT(22,22), DNUF(22,22), Q(22), W(22), G(22), AI(22), B(22),

C IC(22), O(22)

C DEFINE FILE 111(22,56,U,KHX)

C DEFINE FILE 222(22,56,U,KHY)

C DEFINE FILE 333(22,56,U,IOX),444(22,56,U,IQY)

C DEFINE FILE 555(22,56,U,IRI)

C READ(2,102)N,M

101 FORMAT(2I3)

C READ(2,102)OX,OY,VIS

102 FORMAT(8F10.4)

M1=M+1

M2=M+2

M3=M+1

N2=N+2

C CHEQUEAR DATOS DE DISCO

C DO 5 I=2,M2

C READ(111,I)KHX

5 WRITE(3,201)(KHH(J),J=1,N2)

201 FORMAT(12F8.1)

C WRITE(3,202)

202 FORMAT(/,/,/)

DO 6 J=2,N2

C READ(222,J)KHY

6 WRITE(3,201)(KHY(I),I=1,M2)

C WRITE(3,202)

DO 7 I=2,M2

C READ(333,I)IO

7 WRITE(3,210)(O(J),J=2,N2)

C WRITE(3,202)

DO 8 J=2,N2

C READ(444,J)IQ

8 WRITE(3,210)(Q(I),I=2,M2)

C WRITE(3,210)(Q(I),I=2,M2)

210 FORMAT(1Y,11F10.2)

PAGE 2

```

C
C  PRESION INICIAL
DO 15 I=2,M2
DO 15 J=2,N2
15  PANT(I,J)=400.0
    RNN=N
    RNI=RN-1
    ADLJ=1.0E25
    I=VAV=90
    RK=0
    IT=0
99  IT=IT+1
    RX=RK+1
    IF(RK-RN1)31,31,30
30  RK=1
31  GAM=4.0*(SIN(RK*3.141593/12.0*RN))**2)
C
C  METODO IMPLICITO EN DIRECCION X
C
C  ELEMENTOS DE MATRIZ TRIDIAGONAL
DO 37 J=2,N2
A(J)=KH4(J-1)
R(J)=- (KH(J-1)+KH(J))+GAM)
C(J)=KH(J)
READ(222,J)KHV
37  D(J)=R(J)*VIS*0.158-(KHV(I-1)*PANT(I-1,J)-(KHV(I-1)+
    1KHV(I)-GAM)*PANT(I,J)+KHV(I)*PANT(I+1,J))
C
C  ALGORITMO DE THOMAS
C
W(2)=C(2)/B(2)
DO 40 L=3,N2
40  W(L)=(C(L)/(B(L)-A(L)*W(L-1))
    G(2)=D(2)/B(2)
DO 41 L=3,N2
41  G(L)=(D(L)-A(L)*G(L-1))/(B(L)-A(L)*W(L-1))
    PNUM(I,N2)=G(N2)
DO 42 L=1,N
    IL=N2-L
42  PNUM(I,IL)=G(IL)-W(IL)*PNUM(I,IL+1)
43  CONTINUE
C
C  METODO IMPLICITO EN DIRECCION Y
C
C  HACEO PANT=PNUE
DO 45 I=2,M2
DO 45 J=2,N2
45  PANT(I,J)=PNUE(I,J)
DO 48 J=2,N2
READ(222,J)KHV
READ(444,J)Q

```

PAGE 3

ELEMENTOS DE MATRIZ TRIANGONAL

```

DO 51 J=2,M2
  A(I)=KVV(I-1)
  B(I)=-(KVV(I)+KVV(I-1)+GAM)
  C(I)=KVV(I)
  READ(1111)KHH
  51 D(I)=C(I)*VIS*0.159-(KHH(J-1)*PANT(I,J-1)-(KHH(J)+
  1KHH(J-1)-GAM)*PANT(I,J)+KHH(J)*PANT(I,J+1))

```

ALGORITMO DE THOMAS

```

W(2)=C(2)/R(2)
DO 54 L=3,M2
  54 W(L)=C(L)/R(L)-A(L)*W(L-1)
  G(2)=D(2)/R(2)
  DO 55 L=3,M2
  55 G(L)=(D(L)-A(L)*G(L-1))/R(L)-A(L)*W(L-1)
  PNUF(M2,J)=G(M2)
  DO 56 L=1,M
  1L=M2-L
  56 PNUF(IL,J)=G(IL)-W(IL)*PNUF(IL+1,J)
  48 CONTINUE
  DELTA=0.0

```

DO 59 J=2,N2

```

  READ(1111)KHH
  READ(2221)C
  59 DELTA=DELTA+(KHH(J)*PNUF(I,J+1)-PNUF(I,J)-KHH(J-1)*(PNUF(I,J)-
  1PNUF(I,J-1))+KVV(I)*(PNUF(I+1,J)-PNUF(I,J))-KVV(I-1)*(PNUF(I,J)-
  2PNUF(I-1,J))-C(J)*0.159*VIS)**2

```

QUERA DE ESTADO CONTINUO

```

  IF(DELTA<0.01)GO,22,62
  62 IF(IT-ITMAX)71,71,64
  64 WRITE(2,205)
  205 FORMAT(1X,'NO ALCANZA ESTADO CONTINUO')
  GO TO 70

```

DO 75 J=2,N2

```

  75 PANT(I,J)=PNUF(I,J)
  ADELTA=DELTA
  GO TO 60
  70 WRITE(2,202)
  WRITE(2,645)DELTA
  645 FORMAT(1X,2F15.7)
  WRITE(2,200)IT
  200 FORMAT(1X,'NUMERO DE ITERACIONES=',I3,/,/,1X,'PRESIONES(LPC)',/)
  DO 78 K=2,M2
  1M2=2-K
  78 WRITE(2,206)I,(PNUF(I,J),J=2,N2)
  206 FORMAT(/,/,1X,I4,11F10.3)
  DO 80 J=2,M2
  80 WRITE(2,207)PNUF(I,J),J=2,N2
  CALL EXIT
  END

```

PAGE 4

FEATURES SUPPORTED
ONE WORD INTEGERS
EXTENDED PRECISION
TAGS

CASE REQUIREMENTS FOR
COMMON C VARIABLES 3600 PROGRAM 1532
END OF COMPILATION

PAGE 1

// JOB

LOG DRIVE CART SPEC CART AVAIL PHY DRIVE
0000 0001 0000

V2 V10 ACTUAL RK CONFIG RK

// FOR

*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
*EXTENDED PRECISION
*IOCS(DISK,CARD,1132 PRINTER)

C RAFAEL NUNFZ SATURNO INGENIERIA DE PETROLEOS

C ESTE PROGRAMA ESCRIBE LOS DATOS DE PERMEABILIDAD-ESPESOR Y LAS
C PRECISIONES CALCULADAS EN CADA_NODO EN EL MOMENTO DE ALCANZAR EL
C ESTADO CONTINUOREAL KHH(12,12),KHHV(12,12),PNUE(12,12)
DEFINE FILE 111(22,56,U,KHX),222(22,66,U,KHY)
DEFINE FILE 555(22,66,U,IP)

READ(2,301)N,M

301 FORMAT(2I3)

302 READ(2,302)DELTX,VIS,POR,SOD,H,Q

FORMAT(6F10.3)

WRITE(3,1)

1 FORMAT(1H1)

308 WRITE(3,298)N,DELTX,POR,H,Q,VIS,SOD,Q

309 FORMAT(1I,35X,'C A R T E R I S T I C A S D E L M O D E
//,T16,'1',T25,'2',T34,'3',T43,'4',T52,'5',T61,'6',T70,'7',T79,
2,'F5,2,12X,'H =',F6,1,1X,'PIES',//,20X,'M =',I3,16X,'V I S =',F4,1,
31X,'C O =',F6,1,1X,'S O =',F5,2,12X,'Q =',F6,1,1X,'P C U R / D I A',//)
WRITE(3,1)
WRITE(3,2)2 FORMAT(24X,'DEFERABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO X ENTRE LOS NODOS EN
MILIDARCIS-PIES',//,T16,'1',T25,'2',T34,'3',T43,'4',T52,'5',T61,'6',T70,'7',T79,
3,'4',T88,'9',T97,'10',T106,'11',T115,'12',//)
DO 3 I=2,123 READ(11,1)(KHH(I,J),J=1,12)
DO 4 I=2,12

K=14-I

4 WRITE(3,5)(K,(KHH(K,J),J=1,12)

5 FORMAT(4X,I2,8X,11(F4,2,5X),F4,2,//)

WRITE(3,6)

6 FORMAT(//25X,'DEFERABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO Y ENTRE LOS NODOS E
IN MILIDARCIS-PIES',//,T16,'1',T26,'3',T36,'4',T46,'5',T56,'6',T66,'7',T76,'8',T86,
3,'9',T96,'10',T106,'11',T116,'12',//)
DO 9 J=2,129 READ(22,2)(KHHV(J,I),I=1,12)
DO 10 J=2,13

K=14-J

10 WRITE(3,11)(K,(KHHV(I,K),I=2,12)

11 FORMAT(4X,I2,8X,10(F4,2,5X),F4,2//)

WRITE(3,1)

WRITE(3,12)

PAGE 7

```

12 FORMAT(///,27X,'D R E S I O N E S   F N   L O S   N O D O S
1   F N   L P C',//,T11,'2',T21,'3',T31,'4',T41,'5',T51,'6',T61,
2,'7',T71,'8',T81,'9',T91,'10',T101,'11',T111,'12',/)
DO 13 I=2,12
13 READ(555,I)(PNUF(I,J),J=2,12)
DO 14 K=2,12
   I=14-K
14 WRITE(3,206)I,(PNUF(I,J),J=2,12)
206 FORMAT(/,1X,14,11F10.3)
   CALL EXIT
   END

```

FEATURES SUPPORTED
 ONE WORD INTEGERS
 EXTENDED PRECISION
 IOCS

CORE REQUIREMENTS FOR
 COMMON 0 VARIABLES 1344 PROGRAM 722

END OF COMPILATION

```

PAGE 1
// JOB
LOG DRIVE CART SPEC CART AVAIL PHY DRIVE
0000 0004 0004 0000
V0 M10 ACTUAL RK CONFIG RK
// FOR
*OME WORD INTEGERS
*EXTENDEO PRECISION
*LIST SOURCE PROGRAM
*IOCS(CISK,CARD,1132 PRINTER)
C
C RAFAEL NUÑEZ SATURNO INGENIERIA DE PETROLEOS
C
C ESTE PROGRAMA CALCULA Y ESCRIBE LAS DIFERENTES POSICIONES DEL
C FRENTE DE INVASION,HASTA QUE ESTE ALCANZA LA RUPTURA
C
REAL KHH(12,12),KVV(12,12)
DIMENSION XV(12,12),YH(12,12),VX(13,13),VY(13,13),PNUE(13,13)
DIMENSION VXD(50),VXD(50),X(50),Y(50)
EQUIVALENCE (DNUF(1,1),VX(1,1))
DEFINE FILE 11(22,66,U,KHX)
DEFINE FILE 22(22,66,U,KHY)
DEFINE FILE 55(22,66,U,IP)
READ(2,201)N,M
301 FORMAT(2I3)
READ(2,302)DELTY,VISAPOR,SOD,H,Q
302 FORMAT(A10,2)
C
C CALCULO DEWFABRILIDADES EN LOS NODOS
C
M1=N+1
M1=M+1
N2=N+2
M2=M+2
N3=N+3
M3=M+3
DO 400 I=2,M2
READ(1,111)(KHH(I,J),J=1,M2)
DO 400 K=1,M1
J=K+K
400 KHH(I,J)=(KHH(I,J)+KHH(I,J-1))/2.0
DO 401 J=2,M2
READ(2,221)(KVV(I,J),I=1,M2)
DO 401 K=1,M1
I=K+K
401 KVV(I,J)=(KVV(I,J)+KVV(I-1,J))/2.0
C
C HACER DEWFABRILIDADES CERO EN LOS BORDES
C
DO 402 I=2,M2
KHH(I,2)=0.0
402 KHH(1,M2)=0.0
DO 403 J=2,M2
KVV(2,J)=0.0
403 KVV(M2,J)=0.0

```

CALCULO DEFLEXIONES ENTRE LOS NODOS

```

404 I=2,M2
      DOAN(555,I) (PNUF(I,J),J=2,N2)
      DNUF(I,1)=PNUF(I,2)
      DNUF(I,N2)=PNUF(I,N1)

```

```

404 DU(I,J)=(PNUF(I,J)+PNUF(I,J-1))/2.0
      DO 405 J=2,N2

```

```

      OFAN(555,I) (PNUF(I,J),I=2,W2)
      DNUF(I,J)=PNUF(I,J)
      DNUF(W2,J)=PNUF(W1,J)

```

```

405 PV(I,J)=(PNUF(I,J)+PNUF(I-1,J))/2.0

```

CALCULO VY Y VY

```

      Z=V15*P000*SQN*DELTY
      DO 408 I=2,W2

```

```

408 VY(I,J-1)=-6.228*(PH(I,J)-PH(I,J-1))*(KHH(I,J-1)/H)/Z
      VY(W2,N2)=VX(W2,N1)

```

```

409 VV(I-1,J)=-6.328*(PV(I,J)-PV(I-1,J))*(KVV(I-1,J)/H)/Z
      VV(W2,N2)=VV(W1,N2)

```

```

510 FORDAT(I,1,27Y,IVFLORDIANES EN SFNTINO X EN PCUR/DIA/PCUA'////
      18Y,19I,9Y,12I,9Y,14I,9X,15I,9X,16I,9X,17I,9X,18I,9X,19I,9X,
      20I,9X,11I,9Y,12I,9Y//)
      DO 419 K=2,W2

```

```

419 WRITE(9,502) I,(VX(I,J),J=2,N2)

```

```

502 FORDAT(I,1,13,11F10.5,/)
      WRITE(9,501)

```

```

501 FORDAT(I,1,1,1)
      WRITE(9,511)
      FORDAT(17Y,IVFLORDIANES EN SFNTINO Y EN PCUR/DIA/PCUA'////
      18Y,19I,9Y,12I,9Y,14I,9X,15I,9X,16I,9X,17I,9X,18I,9X,19I,9X,
      20I,9X,11I,9Y,12I,9Y//)

```

```

411 WRITE(9,503) I,(VV(I,J),J=2,N2)

```

DAMEO CINCUENTA PUNTOS ALREDEDOR DEL POZO

```

      DTCT=ATAN(1.0)*2.0/49.0
      R=SQRT(2.0)*DELTX
      THETA=-DTCT

```

```

412 DO 413 MD=1,50
      THETA=THETA+DTCT
      V(N2)=0*COS(THETA)
      Y(N2)=0*SEN(THETA)
      WRITE(9,600) (MD,V(N2),Y(N2),NP=1,50)
413 FORDAT(1,1,1,47Y,POSICION INICIAL DEL FRENTI'////41X,13PUNTO,8X,
      1V(DIC=1,1,1,9Y,1V(PRESI,1,1,41X,13,1X,FR,3,8Y,FR,3))

```

PAGE 3

```

Y0=N*DELTX
V0=M*DELTX
TIME=POR*SQX(DELTX**2)*N**H/Q
DTE=TIEMPO/10.0

```

ENCUENTRO POSICION DE CADA PUNTO (EN CUAL CUADRADO)

```

ICONT=0
T=0.0
16 ICONT=ICONT+1
DO 413 NP=1,50
  JD=X(NP)/DELTX+2
  ID=Y(NP)/DELTX+2

```

INTERPOLAR PARA ENCONTRAR VELOCIDADES EN CADA PUNTO

```

R,IP=JP
A1=(X(NP)-(RJP-2.0)*DELTX)/DELTX
R,IP=IP
A2=(Y(NP)-(RIP-2.0)*DELTX)/DELTX
V1=VX(IP,JP)*(1.0-A1)+VX(IP,JP+1)*A1
V2=VX(IP+1,JP)*(1.0-A1)+VX(IP+1,JP+1)*A1
VVP(NP)=V1*(1.0-A2)+V2*A2
V1=VY(IP,JP)*(1.0-A2)+VY(IP+1,JP)*A2
V2=VY(IP,JP+1)*(1.0-A2)+VY(IP+1,JP+1)*A2
VVP(NP)=V1*(1.0-A1)+V2*A1
413 CONTINUE

```

ENCUENTRO MAGNITUD DE LA VELOCIDAD MAXIMA

```

VMAX=0.0
DO 414 NP=1,50
  V=(VVP(NP)**2+VVP(NP)**2)
  IF(VMAX-V)10,11,11
10 VMAX=V
11 CONTINUE
VMV=SQRT(VMAX)

```

CALCULAR DT QUE PERMITE AL PUNTO MOVERSE 1/10 DE DELTX

```

DT=0.1*DELTX/VMVX
DO 414 NP=1,50
  X(NP)=X(NP)+VVP(NP)*DT
  Y(NP)=Y(NP)+VVP(NP)*DT
  T=T+DT

```

```

13 IF(T.GT.12.12,13
504 WRITE(2,504)T,T,(NP,X(NP),Y(NP),NP=1,50)
FORMAT(11,1,47V,11HEVA POSICION DEL FUENTE,1,1,41X,1INCREMENTO EN
1EL TIEMPO=,F4,2,1X,1DIAS,1,1,41X,1TIEMPO ACUMULADO=,F7,2,1X,1DIAS,
2,1,41X,1PUNTO,1V,1X,1PIES),1,10X,1Y(PIES),1,1,41X,13,8X,FR,3,3,8X,
250,3)
DTE=DT+TIEMPO/10.0
12 CONTINUE

```

CHEQUEO PARA LA RUPTURA

```

DO 415 NP=1,50
  IF(ABS(Y(NP)-Y0)-DELTX)10,415,415

```

PAGE 4

```

19 IF(ABS(Y(NP)-YP)-DELIX)14,415,415
14 WRITE(3,50)DT,T,(NP,X(NP),Y(NP),NP=1,50)
500 FORMAT(11,40Y,POSICION EN LA RUPTURA'///41X,'INCREMENTO EN FL TI
        'ENDECE',F6,3,1X,'INCIAS',//41X,'TIEMPO ACUMLADO=',F7,3,1X,'DIAS',//
        241Y,'PUNTO',PX,1Y,'PIES)',10X,'Y(PIES)',//((41Y,13,8X,FR,3,8X,F8,3))
        GO TO 506
415 CONTINUE
        IF(ICONT-15000)16,16,17
17 WRITE(3,505)ICONT
505 FORMAT(///,5Y,ICONT=,I5)
506 CALL EXIT
        END

```

FEATURES SUPPORTED:
ONE WORD INTEGERS
EXTENDED PRECISION
IACS

CODE REQUIREMENTS FOR
COMMON C VARIABLES 3466 PROGRAM 1908
END OF COMPILATION

CAPITULO V

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Con el objeto de observar el comportamiento del modelo numérico al efectuar cambios en los valores de ciertos parámetros, hemos hecho variar el producto permeabilidad-espesor y las ratas de flujo.

Presentamos los resultados de tres estudios realizados en el mismo modelo numérico, pero que se diferencian entre sí, por los valores asignados ya sea al producto permeabilidad-espesor o ya sea a las ratas de flujo. En dos de estos estudios se consideró que el modelo posee características homogéneas, mientras que en el tercero los valores asignados al producto permeabilidad-espesor son heterogéneos.

Se debe indicar que en los tres estudios hechos, el valor del espesor (h) siempre ha sido el mismo en todo el modelo, a pesar de que se cambian los valores del producto permeabilidad-espesor, lo que nos indica que solo fue el valor de la permeabilidad (K) el que sufrió variaciones.

Es decir que en los tres estudios realizados se han

considerado las restricciones hechas en la parte B del Capítulo I, pero considerando los cambios indicados anteriormente.

A. MODELO CON CARACTERISTICAS HOMOGENEAS DE SU PRODUCTO PERMEABILIDAD-ESPESOR.

Los estudios hechos al modelo numérico cuando se le asignó a éste características homogéneas de su producto permeabilidad-espesor, nos han dado resultados semejantes a los que se obtendrían cuando se hace estudios por medio de cualquier otro tipo de simulador, sean estos: modelos potenciométricos, modelos electrolíticos, modelos de rayos X, etc. Esta similitud de resultados se puede apreciar si se observa el Gráfico 1 (en el apéndice) y se lo compara con cualquier gráfico obtenido de los resultados de algún otro tipo de simulador al que se le hayan asignado iguales características.

Si sabemos que el tiempo de rompimiento en el caso de un barrido ideal está dado por la fórmula:

$$t_r = \frac{\text{Volumen poroso de aceite (ft)} }{\text{Rata de inyección (ft}^3\text{/día)}} \quad V-1$$

Donde:

$$\text{Volumen poroso de aceite} = Ah (1 - Sw_i)$$

$$\text{Rata de inyección} = qwi$$

Luego:

$$t_r = \frac{A h \phi S_o}{qwi} \quad V-2$$

Entonces:

a) Tendremos que para un estudio hecho en el modelo con una rata de inyección de $250 \text{ ft}^3/\text{día}$, y con los valores de:

$$A = 10000 \text{ ft}^2$$

$$h = 10 \text{ ft}$$

$$\phi = 0.2$$

$$S_o = 0.5$$

el tiempo teórico de ruptura será:

$$t_r = \frac{10000 \times 10 \times 0.2 \times 0.5 \text{ ft}^3}{250 \text{ ft}^3/\text{día}}$$

$$t_r = 40 \text{ días}$$

comparando este valor con el tiempo de ruptura real del modelo que es 33.452 días, vamos a tener:

$$t_{r\text{teórico}} > t_{r\text{real}}$$

b) De igual manera para el estudio hecho sobre el mismo modelo, pero con una rata de inyección de 400 ft³/día, el tiempo teórico de ruptura será:

$$t_r = \frac{10000 \times 10 \times 0.2 \times 0.5 \text{ ft}^3}{400 \text{ ft}^3/\text{día}}$$

$$t_r = 25 \text{ días}$$

Comparando este valor con el tiempo de ruptura real del modelo que es 20.908 días, tendremos:

$$t_{r_{\text{teórico}}} > t_{r_{\text{real}}}$$

En estos dos estudios hemos tenido resultados similares, con la diferencia de que la ruptura se alcanza mucho más rápido con una mayor rata de inyección, como es lógico.

Sabiendo que la eficiencia areal de barrido es la fracción del área horizontal del yacimiento, donde ha ocurrido el proceso de recuperación, medimos con planímetro el área barrida hasta el momento de la ruptura en el gráfico 1, y obtuvimos un valor de 84.445.

B. MODELO CON CARACTERISTICAS HETEROGENEAS DE SU PRODUCTO PERMEABILIDAD - ESPESOR.

Los ~~resultados~~ que hemos obtenido en el estudio del modelo numérico cuando a este le fueron asignado valores heterogéneos para su producto permeabilidad-espesor, se encuentran representados en el Gráfico 2. La irregularidad de las curvas que nos representan el frente de invasión, nos indican que el desplazamiento está de acuerdo con las características asignadas al modelo.

El tiempo de ruptura que se obtiene por medio de la fórmula V-2, para este modelo con una rata de inyección de $400 \text{ ft}^3/\text{día}$ y los valores:

$$A = 10000 \text{ ft}^2$$

$$h = 10 \text{ ft}$$

$$\phi = 0.2$$

$$S_0 = 0.5$$

$$t_r = \frac{10000 \times 10 \times 0.2 \times 0.5 \text{ ft}^3}{400 \text{ ft}^3/\text{día}}$$

$$t_r = 25 \text{ días}$$

Comparando con el valor del tiempo de ruptura real del modelo que es: 17.430 días, nos indica que:

$$\tau_{\text{teórico}} > \tau_{\text{real}}$$

Debe indicarse que en este caso se ha considerado un modelo más permeable que los dos anteriores, a pesar de su heterogeneidad respecto al producto permeabilidad-espesor, lo que hizo que el rompimiento se realice más rápido.

La eficiencia areal de barrido que se ha obtenido de planimetrar el área barrida hasta el momento de la ruptura en el Gráfico 2 es 65.93, lo que nos indica que las heterogeneidades redujeron el valor de esta eficiencia.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

La simulación numérica que se ha realizado en este trabajo, se la ha basado en datos teóricos, aunque sin ningún problema se lo podría llevar a cabo con datos reales de un yacimiento, pero respetando las consideraciones asumidas en la sección B del capítulo I.

Para la realización de este estudio hemos hecho uso de las Ecuaciones de Flujo, las Diferencias Finitas, el Método Implícito de Dirección Alternante, el Algoritmo de Thomas, y una Computadora IBM-1130 por medio del lenguaje Fortran IV. Además de que se utilizó cincuenta puntos para hacerlos viajar desde el pozo inyector hasta el pozo productor. Todo este proceso está escrito en lenguaje Fortran en cuatro programas, los cuales ya fueron analizados en el Capítulo IV.

Debe indicarse que no se ha escogido un modelo de mayores dimensiones y no se ha hecho variar otros parámetros debido a que el tiempo de computación es bastante grande, especialmente en lo referente a la estabilización de la presión, pues solo para este pequeño mode-

lo toma unos 25 a 30 minutos.

Los programas han sido hechos de tal manera que se puede aumentar la precisión de los resultados al aumentar el número de nodos de la malla y disminuir los valores de Δx y Δy . También pueden variarse las dimensiones del modelo pues esto está previsto en los programas

En lo referente al Método Implícito de Dirección alternante diremos que se obtuvo convergencia a la 11^a iteración para el modelo homogéneo y a la 13^a iteración para el modelo heterogéneo.

En lo que respecta a los resultados, debemos concluir que han sido satisfactorios, según los cálculos teóricos, como lo demuestran las comparaciones hechas en el capítulo V en lo referente al tiempo de ruptura y a la eficiencia areal de barrido.

Se concluye que el método usado en este estudio - trabaja muy bien en los casos que se los ha aplicado, sin embargo con el uso de la Computadora IBM 1130 es muy difícil aplicarlo a problemas prácticos de campo por la capacidad de la memoria de la máquina y el tiempo de computación que se requeriría.

RECOMENDACIONES

1. Hacer un estudio del modelo matemático asignándole a sus dimensiones y características valores reales, eso si respetando las limitaciones hechas para el modelo.
2. Comprobar los resultados obtenidos por medio de la simulación matemática con los resultados que se obtengan de un análisis por cualquier otro tipo de simulador, para un modelo semejante a este.
3. Aumentar la precisión de los resultados suponiendo una malla con mayor número de nodos, pero con menores Δx i Δy , de tal forma que la ruptura se produzca a una distancia lo menor posible del pozo productor.
4. Extender el presente trabajo a un yacimiento completo con varios pozos productores e inyectores.
5. Hacer un estudio de factores de convergencia, ya que estos juegan un papel muy importante en este método.

APENDICE A

DEDUCCION DE LAS ECUACIONES DE FLUJO

La ecuación matemática que nos describe el movimiento de los fluidos, puede detenerse la partiendo de los siguientes principios físicos:

1. Ley de la conservación de la masa.
2. Ley de Darcy.
3. Ecuación de estado del fluido

La ley de la conservación de la masa se la expresa por la ecuación de la continuidad. Para escribir la ecuación de continuidad vamos a considerar un fluido que fluye a través de un elemento de volumen (Fig. A-1).

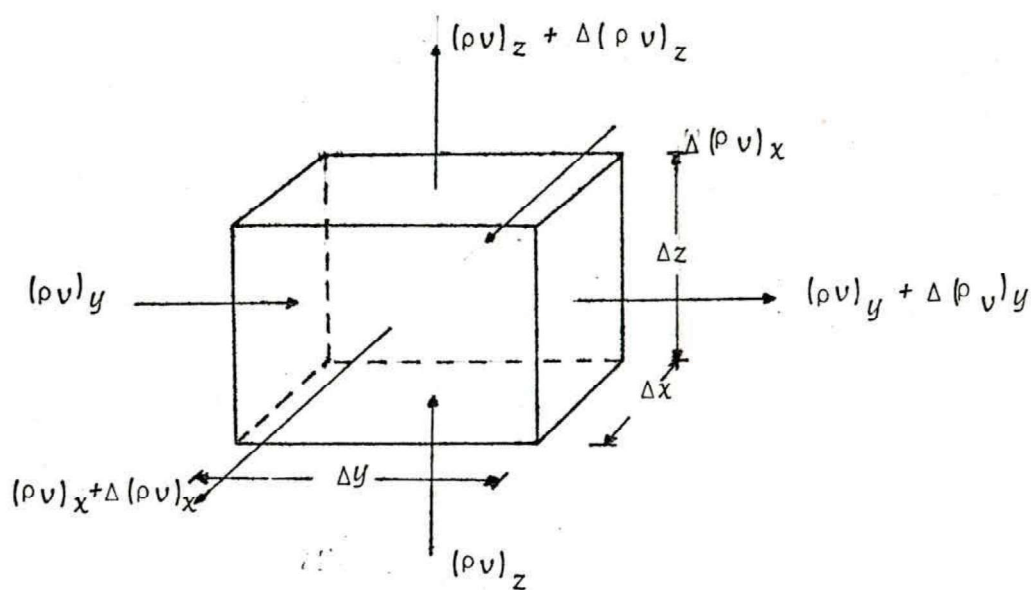


FIGURA A-1

Esta ecuación establece que:

$$\begin{array}{rcccl} \text{Masa de fluido} & & \text{Masa de fluido} & & \text{Variación} \\ \text{que entra} & - & \text{que sale} & = & \text{de masa} \end{array} \quad \text{A-1}$$

Entonces, si estas ratas de flujo másico son volumétricas se puede expresar:

$$\text{Masa de fluido que entra} = (\rho v)_x \Delta y \Delta z \Delta t + (\rho v)_y \Delta x \Delta z \Delta t + (\rho v)_z \Delta x \Delta y \Delta t$$

$$\begin{aligned} \text{Masa de fluido que sale} &= ((\rho v)_x + \Delta(\rho v)_x) \Delta y \Delta z \Delta t + ((\rho v)_y + \Delta(\rho v)_y) \Delta x \Delta z \Delta t + \\ & \quad ((\rho v)_z + \Delta(\rho v)_z) \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned}$$

$$\text{Variación de masa} = \Delta x \Delta y \Delta z (\phi \rho S)_{t+\Delta t} - (\phi \rho S)_t$$

Reemplazando estas expresiones en A-1, y desarrollando tenemos:

$$-\Delta t \Delta y \Delta z \Delta(\rho v)_x + \Delta x \Delta z \Delta(\rho v)_y + \Delta x \Delta y \Delta(\rho v)_z = \Delta x \Delta y \Delta z (\phi \rho S)_{t+\Delta t} - (\phi \rho S)_t$$

Dividiendo todo para $\Delta x \Delta y \Delta z \Delta t$:

$$-\frac{\Delta(\rho v)_x}{\Delta x} + \frac{\Delta(\rho v)_y}{\Delta y} + \frac{\Delta(\rho v)_z}{\Delta z} = \frac{(\phi \rho S)_{t+\Delta t} - (\phi \rho S)_t}{\Delta t}$$

Pasando al límite cuando: x, y, z, t tienden a cero podemos escribir:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho v)_x + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v)_y + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v)_z = - \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho S) \quad A-2$$

En donde los términos son:

v = velocidad del fluido

ρ = densidad del fluido

x, y, z = direcciones según los ejes coordenados

ϕ = porosidad

S = saturación del fluido

t = tiempo

Según la ley de Darcy:

$$v_x = - \frac{K_x K_r}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad A-3$$

$$v_y = - \frac{K_y K_r}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \quad A-4$$

$$v_z = - \frac{K_z K_r}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \quad A-5$$

Donde:

v = velocidad del fluido (cm/seg.)

- K_r = Permeabilidad relativa del fluido
 K_x, K_y, K_z = Permeabilidad en las direcciones x, y, z (Darcy)
 μ = Viscosidad del fluido (cp)
 P = Presión que actúa sobre el fluido (atm)

Reemplazando estas expresiones en A-2

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho K_r K_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho K_r K_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho K_r K_z}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho S) \quad A-6$$

Si consideramos $S=1$ para flujo monofásico y también $K_r = 1$, entonces tendremos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho K_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho K_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho K_z}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = \frac{\partial P}{\partial t} (\phi \rho) \quad A-7$$

De la ecuación de estado tenemos que a temperatura constante:

$$c = - \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T \quad A-8$$

Donde:

- c = compresibilidad
 v = volumen
 P = presión

t = temperatura

Esto se puede expresar en función de la densidad.

$$C = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T \quad A-9$$

De donde:

$$\partial \rho = \rho C \partial P$$

Dividiendo ambos miembros para U ; tendremos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial U} = \rho C \frac{\partial P}{\partial U} \quad A-10$$

Derivando en la expresión A-7 considerando viscosidad, permeabilidad y porosidad constantes, y ordenando luego:

$$\frac{\rho}{\mu} K_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\rho}{\mu} K_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\rho}{\mu} K_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{1}{\mu} \left[K_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + K_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} + K_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial P}{\partial z} \right] = \phi \frac{\partial P}{\partial t}$$

Usando A-10 en el segundo término del primer miembro de esta última igualdad:

$$\frac{\rho}{\mu} K_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\rho}{\mu} K_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\rho}{\mu} K_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{\rho C}{\mu} \left[K_x \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 \right] = \phi \rho C \frac{\partial P}{\partial t}$$

Asumiendo que los gradientes de presión suficientemente pequeños como para que sus cuadrados sean despreciados y que igualmente la compresibilidad es pequeña tendremos:

$$\frac{\partial K_x}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\rho K_y}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\rho K_z}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \phi \rho c \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-11$$

Simplificando términos semejantes, asumiendo que: $K_x = K_y = K_z = K$, y trasponiendo nos queda:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{\phi \mu c}{\partial K} \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-12$$

La A-12 consideramos variación de movilidad, tendremos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = \phi c \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-12$$

Para flujo bidimensional el tercer término del primer miembro de A-13 es cero, luego esta se convierte en:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \phi c \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-14$$

Si multiplicamos todo A-14 por h , donde este es el espesor y consideramos que este varía con la posición sobre

el plano x - y , es decir $h(x,y)$, vamos a tener:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \phi ch \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-15$$

Puesto que estos términos en A-15 no son otra cosa que velocidades, y como:

$$v = \frac{q}{A} = - \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad A-16$$

Donde:

q = rata de inyección o producción (cm^3/seg)

A = Area perpendicular al flujo = $h \Delta y$ (cm^2)

Entonces reemplazando A en la ecuación A-16.

$$\frac{q}{h \Delta y} = - \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

Dividiendo ambos miembros para Δx y trasponiendo h :

$$\frac{q}{\Delta x \Delta y} = - \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{Kh}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta x} \right) \quad A-17$$

La A-17 llevada al límite cuando x tiende a cero nos dá una expresión similar al primer término del lado izquierdo de A-15. Igualmente tendríamos para el caso de

que fuera en sentido y la expresión.

Luego si añadimos a A-15 un término de inyección tendremos que hacerlo según A-17, y entonces:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{q}{\Delta x \Delta y} = \phi c h \frac{\partial P}{\partial t} \quad \text{A-18}$$

En el caso de un fluido incompresible, la ecuación A-18 tendrá su segundo miembro igual a cero, y tendremos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{q}{\Delta x \Delta y} = 0 \quad \text{A-19}$$

Que es la ecuación de Laplace modificada para permitir la variación del producto movilidad-espesor, y con un término de inyección añadido.

La ecuación A-18 está expresada en las unidades siguientes:

q en cm^3/seg ; x, y, h en cm ; P en atm ; K en Darcys; en centipoise; c en atm^{-1} en porcentaje.

La misma ecuación A-18, expresada en unidades de campo es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{q}{1,127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi ch}{1.127 \times 5.615} \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-20$$

Donde:

q está dado en Bbl/día; K en Darcy; Δx , Δy , h en pies;
 P en lbs/pulg² absolutas (psia); en t en días; μ en cen-
 tipoise; c en psia⁻¹; ϕ en porcentaje.

APENDICE B

TIPOS DE ECUACIONES DIFERENCIALES PARCIALES

Las ecuaciones diferenciales parciales son de tipo no lineal cuando los coeficientes de las derivadas son funciones de las variables independientes y dependientes. En este caso es difícil su clasificación.

Una ecuación diferencial parcial general, tiene la forma:

$$A(x,y)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + B(x,y)\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + C(x,y)\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f(x,y,u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}) \quad B-1$$

Si $f = 0$ la ecuación puede ser reducida por medio de una transformación de variables a uno de los siguientes tipos: elíptica, parabólica o hiperbólica, dependiendo de si: $B^2 - 4AC$ es menor, igual o mayor que cero.

Como simples ejemplos de tipos de ecuaciones diferenciales parciales tenemos:

$$\text{Ecuación de Laplace: } \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{elíptica})$$

$$\text{Ecuación de difusividad: } \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{parabólica})$$

Ecuación de la onda: $\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$ (hiperbólica)

APENDICE C
 APROXIMACION DE DERIVADAS POR DIFERENCIAS
 FINITAS

Consideremos una función $u(x)$, la cual junto con su derivada son funciones continuas de x (Figura C1). Si ex pandimos la función usando la serie de Taylor, tendremos:

$$u(x+\Delta x) = u(x) + \Delta x u'(x) \Big|_x + \frac{(\Delta x)^2}{2} u''(x) \Big|_x + \frac{(\Delta x)^3}{6} u'''(x) \Big|_x + \dots \text{C-1}$$

o también:

$$u(x-\Delta x) = u(x) - \Delta x u'(x) \Big|_x + \frac{(\Delta x)^2}{2} u''(x) \Big|_x - \frac{(\Delta x)^3}{6} u'''(x) \Big|_x + \dots \text{C-2}$$

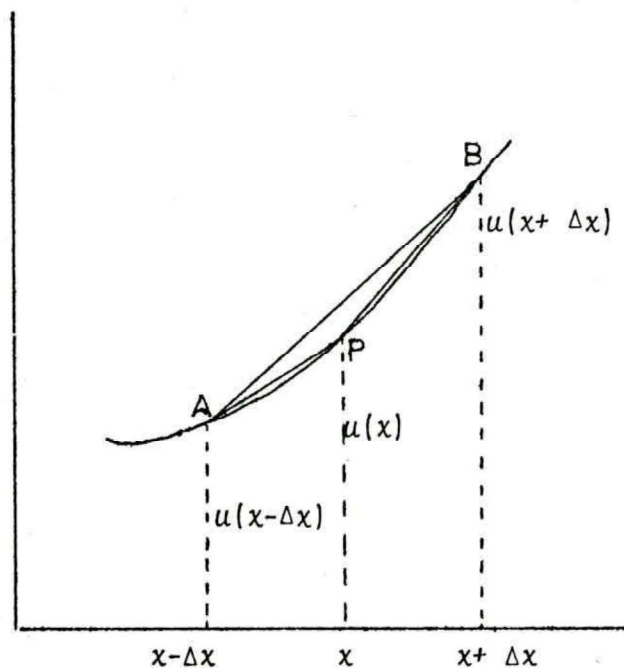


FIGURA C-1

Despejando $U'(x)$ en C-1:

$$U'(x) \Big|_x = \frac{U(x + \Delta x) - U(x)}{\Delta x} + \frac{\sigma(\Delta x)^2}{\Delta x}$$

$$U'(x) \Big|_x = \frac{U(x + \Delta x) - U(x)}{\Delta x} + \sigma(\Delta x) \quad \text{C-3}$$

Donde $\sigma(\Delta x)^2$ nos indica términos que contienen segunda y mayores potencias de Δx y nos da el error de trunca
ción.

La igualdad C-3 es la aproximación de la primera deri
vada por medio de una diferencia progresiva.

Igualmente de C-2:

$$U'(x) \Big|_x = \frac{U(x) - U(x - \Delta x)}{\Delta x} + \sigma(\Delta x) \quad \text{C-4}$$

La igualdad C-4 es la aproximación de $U'(x)$ por una
diferencia regresiva.

Si restamos C-2 de C-1, tendremos:

$$U(x + \Delta x) - U(x - \Delta x) = 2\Delta x U'(x) \Big|_x + \sigma(\Delta x)^3$$

Despejando $U'(x)$:

$$u'(x) \Big|_x = \frac{u(x + \Delta x) - u(x - \Delta x)}{2 \Delta x} + \sigma (\Delta x)^2 \quad \text{C-5}$$

La igualdad C-5 es la aproximación de $u'(x)$ por una diferencia central. Aquí se comete un error de truncación del orden de $(\Delta x)^2$.

Si se suman C-1 y C-2, tendremos:

$$u(x + \Delta x) + u(x - \Delta x) = 2u(x) + (\Delta x)^2 u''(x) \Big|_x + \sigma (\Delta x)^4$$

Despejando $u''(x)$:

$$u''(x) \Big|_x = \frac{u(x + \Delta x) - 2u(x) + u(x - \Delta x)}{(\Delta x)^2} + \sigma (\Delta x)^2 \quad \text{C-6}$$

La igualdad C-6 es la aproximación de la segunda derivada por medio de una diferencia central. Esta se puede descomponer en la forma:

$$u''(x) \Big|_x = \frac{\frac{u(x + \Delta x) - u(x)}{\Delta x} - \frac{u(x) - u(x - \Delta x)}{\Delta x}}{\Delta x} + \sigma (\Delta x)^2 \quad \text{C-7}$$

APENDICE D
SISTEMA DE MALLAS (10)

Dos tipos de malla son comunmente utilizados en los trabajos de reservorio:

- a) En un tipo de malla tenemos al rectángulo dividido en bloques interiores y el punto (x_j, y_i) se considera - que se encuentra en el centro del bloque (i, j) (Figura D1). Así vamos a tener bloques en la dirección x e 1 bloque en la dirección y .

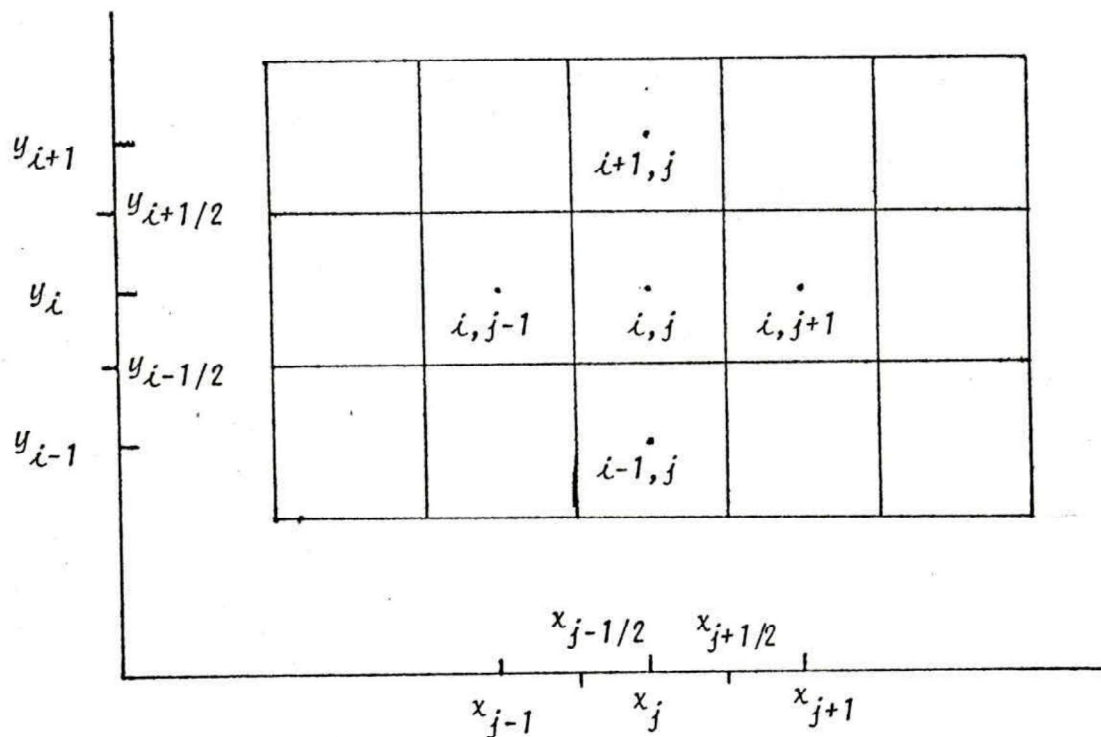


FIGURA D-1

En este sistema la coordenada $x_{j-1/2}$ nos indica el lado izquierdo del bloque y $x_{j+1/2}$ nos indica el lado derecho del bloque, así mismo $y_{i-1/2}$ nos indica el lado inferior del bloque i y $y_{i+1/2}$ nos indica el lado superior del mismo.

Este tipo de malla se la conoce con el nombre de malla de bloque centrado.

Aquí la malla se especifica por la secuencia.

$$x_{1/2}, x_{3/2}, x_{5/2}, \dots, x_{j+1/2} \quad i \quad y_{1/2}, y_{3/2}, y_{5/2}, \dots, y_{i+1/2}$$

Además:

$$x_j = \frac{1}{2} (x_{j-1/2} + x_{j+1/2})$$

$$y_i = \frac{1}{2} (y_{i-1/2} + y_{i+1/2})$$

- b) En el otro tipo de malla el rectángulo está dividido - por la malla, pero el punto (x_j, y_i) , también llamado punto (i, j) es ahora considerado en la intersección de cada línea de la malla. Así vamos a tener $j+1$ intersecciones en la dirección x e $i+1$ intersecciones en la dirección y (Figura D2).

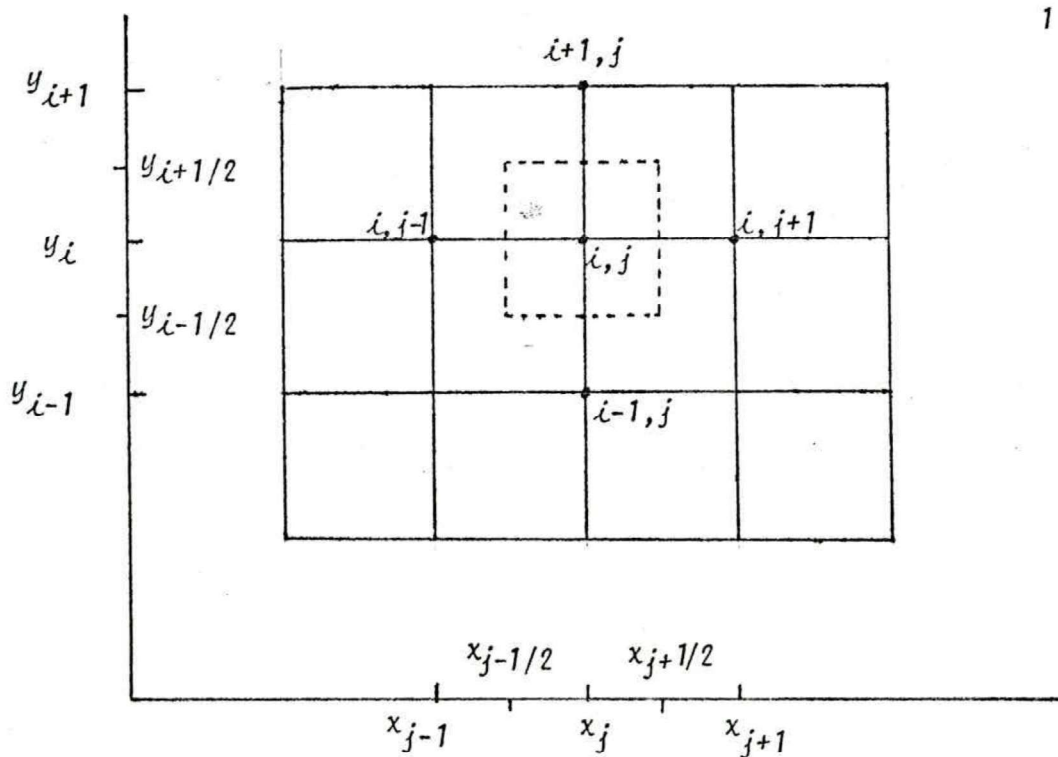


FIGURA D-2

No se le ha dado un nombre particular a este tipo de malla, pero se la puede nominar como malla de rejilla. Se puede mantener todavía la noción de bloque centrado, pero en este caso el punto no se halla exactamente en el centro del bloque.

Aquí la malla se especifica por la secuencia:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_{j+1} \quad i \quad y_1, y_2, y_3, \dots, y_{i+1}$$

Además:

$$x_{j+1/2} = \frac{1}{2} (x_j + x_{j+1})$$

$$y_{i+1/2} = \frac{1}{2} (y_i + y_{i+1})$$

APENDICE "E"
CONDICIONES DE BORDE (8,9)

La solución de una ecuación diferencial parcial implica la obtención de valores numéricos para las variables dependientes dentro de una región R , en los límites de la cual los valores de la función o de sus derivadas o ambos a la vez son especificados de alguna manera.

En el caso más simple de valores de la variable dependiente están dados en los bordes, así por Ej.: el valor de la presión en cada límite de una región rectangular puede ser especificado.

El caso siguiente es donde los valores de las derivadas son especificados en los límites de la región considerada. Así por Ej.: la derivada normal de presión en los bordes puede asignársela con cero (el reservorio es cerrado no no existe flujo en los bordes).

Otra condición de borde puede incluir a las dos anteriores combinadas, así como complicantes características.

Si nosotros asumimos que $u = u(x, y, t)$, que satis-

face la ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial P}{\partial t} \quad E-1$$

En una región R que tiene un borde C , estando R y C en el plano xy . Hasta aquí se asume que u especificada como una función g de tiempo y posición en C . Sin embargo este no es el único tipo de condición de borde. Se podría utilizar las derivadas u_n y u_s para especificar la condición o quizás se podría utilizar u_n , u_s y u .

Aquí:

u_s = derivada tangencial al borde.

u_n = derivada normal al borde.

Es decir que nosotros tendríamos en C (figura E1):

Condición de Dirichlet: $u = g$

Condición de Neumann: $\alpha u_n + \beta u_s = g$

Tercera condición: $\alpha u_n + \beta u_s + \gamma u = g$

En el caso de una región rectangular sin flujo en sus bordes o sea con límite cerrado, se puede expresar matemáticamente a estos bordes por dos procedimientos: por medio de nodos de reflexión o haciendo las permeabilidada

des cero en los bordes.

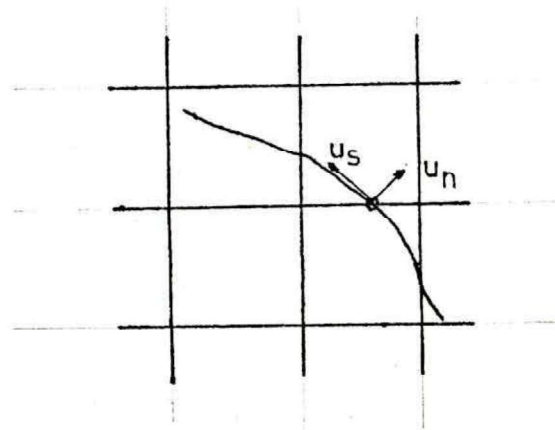


FIGURA E-1

Para el primer procedimiento, aseguramos no-flujo a través de un nodo A (Fig. E2), introduciendo un imaginario nodo B' fuera del borde de manera que este último sea la imagen del nodo B que se halla dentro del borde. Entonces las presiones son iguales en B y B', por consiguiente:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_A = \frac{P_B - P_{B'}}{2\Delta x} = 0 \quad \text{E-2}$$

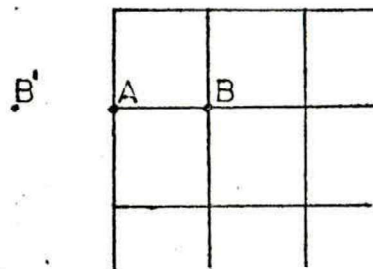


FIGURA E-2

En el caso de hacer cero las permeabilidades en el borde, también se sigue cumpliendo la igualdad E-2 para el Nodo A.

APENDICE F

DEDUCCION DE LAS FORMULAS DEL METODO DE THOMAS PARA RESOLVER UN SISTEMA TRIAGONAL DE ECUACIONES

Supongamos que tenemos un sistema de 4 ecuaciones con incógnitas x_1, x_2, x_3, x_4 representado por la ecuación matricial.

$$Ax = D$$

Donde:

$$A = \begin{vmatrix} b_1 & c_1 & & \\ a_2 & b_2 & c_2 & \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 \end{vmatrix}$$

y

$$x \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{vmatrix} \quad D = \begin{vmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{vmatrix}$$

Si utilizamos el método de eliminación de Gauss para resolver esta ecuación matricial, tendremos:

La matriz aumentada es: $C = [A \mid D]$

$$C = \left| \begin{array}{cccc|c} b_1 & c_1 & & & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & & d_2 \\ & a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ & & a_4 & b_4 & d_4 \end{array} \right|$$

Dividiendo la primera fila para $b_1 = w_1$

$$C = \left| \begin{array}{cccc|c} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & \frac{d_1}{w_1} \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & d_2 \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & d_4 \end{array} \right|$$

Multiplicando la primera fila por a_2 y restando a la segunda fila, llamando $\frac{d_1}{w_1} = g_1$

$$C = \left| \begin{array}{cccc|c} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & (b_2 - \frac{a_2 c_1}{w_1}) & c_2 & 0 & (d_2 - a_2 g_1) \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & d_4 \end{array} \right|$$

Hacemos $(b_2 - \frac{a_2 c_2}{w_1}) = w_2$, y dividimos la 2^o fila por w_2 :

$$C = \left| \begin{array}{ccccc} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & 1 & \frac{c_2}{w_2} & 0 & \frac{d_2 - a_2 g_1}{w_2} \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & d_4 \end{array} \right|$$

Hacemos $(\frac{d_2 - a_2 g_1}{w_2}) = g_2$, multiplicando la 2^o fila por a_3 y restando a la 3^o fila:

$$C = \left| \begin{array}{ccccc} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & 1 & \frac{c_2}{w_2} & 0 & g_2 \\ 0 & 0 & (b_3 - \frac{a_3 c_2}{w_2}) & c_3 & (d_3 - a_3 g_2) \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & d_4 \end{array} \right|$$

Haciendo $(b_3 - \frac{a_3 c_2}{w_2}) = w_3$, y dividiendo la 3^o fila por w_3 :

$$C = \left| \begin{array}{ccccc} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & 1 & \frac{c_2}{w_2} & 0 & g_2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{c_3}{w_3} & \left(\frac{d_3 - a_3 g_2}{w_3} \right) \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & d_4 \end{array} \right|$$

Haciendo $\left(\frac{d_3 - a_3 g_2}{w_3} \right) = g_4$, multiplicando la 3ª fila por a_4 y restando de la 4ª fila.

$$C = \left| \begin{array}{ccccc} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & 1 & \frac{c_2}{w_2} & 0 & g_2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{c_3}{w_3} & g_3 \\ 0 & 0 & 0 & \left(b_4 - \frac{a_4 c_3}{w_3} \right) & (d_4 - a_4 g_3) \end{array} \right|$$

Hacemos $\left(b_4 - \frac{a_4 c_3}{w_3} \right) = w_4$ y dividimos la 4ª fila para w_4 :

$$C = \left| \begin{array}{ccccc} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & 1 & \frac{c_2}{w_2} & 0 & g_2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{c_3}{w_3} & g_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \left(\frac{d_4 - a_4 g_3}{w_4} \right) \end{array} \right|$$

Haciendo $\left(\frac{d_4 - a_4 d_3}{w_4}\right) = g_4$:

$$C = \begin{vmatrix} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & 1 & \frac{c_2}{w_2} & 0 & g_2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{c_3}{w_3} & g_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & g_4 \end{vmatrix}$$

Luego tendremos que:

$$x_4 = g_4$$

$$x_3 = g_3 - \frac{c_3 x_4}{w_3}$$

$$x_2 = g_2 - \frac{c_2 x_3}{w_2}$$

$$x_1 = g_1 - \frac{c_1 x_2}{w_1}$$

Se puede observar que un procedimiento similar es aplicable a un mayor número de ecuaciones, luego para un sistema de $N+1$ ecuaciones con $N+1$ infinitas se lo puede resolver usando el siguiente logaritmo:

$$x_k = g_k - \frac{c_k x_{k+1}}{w_k} \quad (1 \leq k \leq n)$$

$$x_n = g_n$$

Donde:

$$w_k = b_k - \frac{a_k c_{k-1}}{w_{k-1}} \quad (2 \leq k \leq n+1)$$

$$w_1 = b_1$$

$$g_k = \frac{d_k - a_k g_{k-1}}{w_k} \quad (2 \leq k \leq n+1)$$

$$g_1 = \frac{d_1}{w_1}$$

MONOGRAMAS

SIMBOLO	FORTRAN	
a	A	Coefficiente de la matriz
b	B	Coefficiente de la matriz
c	C	Coefficiente de la matriz
d	D	Coefficiente de la matriz
g	G	Elemento del algoritmo de Thomas
w	W	Elemento del algoritmo de Thomas
h	H	Espesor del modelo
K_x	KHH	Permeabilidad en dirección x
K_y	KHV	Permeabilidad en dirección y
q	Q	Rata de flujo
r	R	Radio
t	T	Tiempo
v_x	VX	Velocidad en dirección x
v_y	VY	Velocidad en dirección y
v	v	Velocidad
x	X	Posición en x
y	Y	Posición en y
m	M	Número de intervalos en dirección y
n	N	Número de intervalos en dirección x
	PANT	Presión en tiempo anterior
	PNUE	Presión actual
Sod	SOD	Saturación de aceite desplazable

SIMBOLO	FORTRAN	
Δ	DELTA	Cambio de presión en el progreso de los cálculos.
$\Delta x = \Delta y$	DELTX	Longitud del intervalo
Δt	DT	Incremento en el tiempo
Δx	DX	Longitud del intervalo en dirección x.
Δy	DY	Longitud del intervalo en dirección y.
$\Delta \theta$	DTHET	Incremento en el ángulo
γ	GAM	Parámetro de iteración
ϕ	POR	Porosidad
μ	VIS	Viscosidad

CARACTERISTICAS DEL MODELO

N = 10
M = 10

DELTA X = 10.0 PIES
V I S = 1.0 CP

P O R = 0.20
S O D = 0.50

H = 10.0 PIES
Q = 250.0 PCUB/DIA

PERMEABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO X ENTRE LOS NODOS EN MILIDARCIS-PIES

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
11	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
10	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
9	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
8	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
7	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
6	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
5	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
4	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
3	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
2	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00

PERMEABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO Y ENTRE LOS NODOS EN MILIDARCIS-PIES

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

PRESIONES EN LOS NODOS EN L P C

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	100.000	99.281	97.845	95.684	92.764	89.007	84.240	78.113	69.900	57.977	39.231
11	100.718	100.000	98.571	96.440	93.600	90.013	85.594	80.191	73.605	65.793	57.977
10	102.154	101.428	100.000	97.905	95.180	91.849	87.928	83.447	78.527	73.605	69.900
9	104.315	103.559	102.094	100.000	97.363	94.271	90.818	87.134	83.447	80.191	78.113
8	107.235	106.399	104.819	102.636	100.000	97.052	93.936	90.818	87.928	85.594	84.240
7	110.992	109.986	108.150	105.728	102.947	100.000	97.052	94.271	91.849	90.013	89.007
6	115.759	114.405	112.071	109.181	106.063	102.947	100.000	97.363	95.180	93.600	92.764
5	121.886	119.908	116.552	112.865	109.181	105.728	102.636	100.000	97.905	96.440	95.684
4	130.099	126.394	121.472	116.552	112.071	108.150	104.819	102.094	100.000	98.571	97.845
3	142.022	134.206	126.394	119.808	114.405	109.986	106.399	103.559	101.428	100.000	99.231
2	141.768	142.022	130.099	121.886	115.759	110.992	107.235	104.315	102.154	100.718	100.000

VELOCIDADES EN SENTIDO X EN PCUB/DIA/PCUA

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
12	0.00000	0.68153	1.13839	1.60773	2.11245	2.69712	3.44699	4.53695	6.37089	10.02032	10.02032
11	0.00000	0.67909	1.12620	1.57293	2.03237	2.53289	3.10776	3.79357	4.55570	4.94460	0.00000
10	0.00000	0.68153	1.11467	1.52502	1.91606	2.29426	2.65846	2.97446	3.11403	2.72958	0.00000
9	0.00000	0.70282	1.12620	1.49702	1.81243	2.07062	2.25822	2.33239	2.19668	1.68774	0.00000
8	0.00000	0.74424	1.19058	1.52502	1.75689	1.91851	1.97227	1.90078	1.65285	1.15709	0.00000
7	0.00000	0.89921	1.34714	1.64620	1.81243	1.86523	1.81243	1.64620	1.34714	0.89921	0.00000
6	0.00000	1.16709	1.65285	1.90078	1.97227	1.91851	1.75689	1.52503	1.19058	0.76424	0.00000
5	0.00000	1.68774	2.19668	2.33239	2.25822	2.07062	1.81243	1.49703	1.12620	0.70282	0.00000
4	0.00000	2.72958	3.11403	2.97446	2.65846	2.29426	1.91606	1.52503	1.11467	0.68153	0.00000
3	0.00000	4.04460	4.55570	3.79357	3.10776	2.53289	2.03337	1.57293	1.12620	0.67909	0.00000
2	10.02032	10.02032	6.37089	4.53695	3.44699	2.69712	2.11245	1.60773	1.13839	0.68153	0.00000

VELOCIDADES EN SENTIDO Y EN PCUR/DIA/PCUA

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	10.02032
11	0.68153	0.67909	0.68153	0.76424	0.89921	1.16709	1.68774	2.72958	4.94460	10.02032
10	1.13839	1.12620	1.11467	1.19058	1.34714	1.65285	2.19668	3.11403	4.55570	6.37089
9	1.60773	1.57293	1.52503	1.49703	1.64620	1.90078	2.33239	2.97446	3.79357	4.53695
8	2.11245	2.03337	1.91606	1.81243	1.81243	1.97227	2.25822	2.65846	3.10776	3.44699
7	2.69712	2.53289	2.29426	2.07062	1.86523	1.91851	2.07062	2.29426	2.53289	2.69712
6	3.44699	3.10776	2.65846	2.25822	1.97227	1.81243	1.75689	1.81243	1.91606	2.03337
5	4.53695	3.79357	2.97446	2.33239	1.90078	1.64620	1.49702	1.52502	1.57293	1.60773
4	6.37089	4.55570	3.11403	2.19668	1.65285	1.34714	1.19059	1.12620	1.11467	1.13839
3	10.02032	4.04460	2.72958	1.68774	1.15709	0.89921	0.76424	0.70282	0.68153	0.68153
2	10.02032	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

POSICION INICIAL DEL FRENTE

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	14.142	0.000
2	14.134	0.453
3	14.113	0.906
4	14.076	1.357
5	14.026	1.808
6	13.960	2.257
7	13.881	2.703
8	13.787	3.146
9	13.679	3.587
10	13.557	4.023
11	13.421	4.456
12	13.271	4.884
13	13.108	5.307
14	12.931	5.724
15	12.741	6.136
16	12.538	6.541
17	12.322	6.939
18	12.093	7.331
19	11.852	7.715
20	11.598	8.090
21	11.333	8.458
22	11.056	8.817
23	10.768	9.167
24	10.469	9.507
25	10.159	9.838
26	9.838	10.158
27	9.507	10.469
28	9.167	10.768
29	8.817	11.056
30	8.458	11.333
31	8.090	11.598
32	7.715	11.852
33	7.331	12.093
34	6.939	12.322
35	6.541	12.538
36	6.136	12.741
37	5.724	12.931
38	5.307	13.108
39	4.884	13.271
40	4.456	13.421
41	4.023	13.557
42	3.587	13.679
43	3.146	13.787
44	2.703	13.881
45	2.257	13.960
46	1.808	14.026
47	1.357	14.076
48	0.906	14.113
49	0.453	14.134
50	0.000	14.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.251 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 4.038 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	36.142	0.000
2	35.872	1.099
3	35.590	2.211
4	35.292	3.339
5	34.975	4.481
6	34.640	5.542
7	34.285	6.824
8	33.906	8.026
9	33.504	9.256
10	33.075	10.513
11	32.611	11.728
12	32.117	12.884
13	31.602	13.986
14	31.070	15.037
15	30.519	16.048
16	29.951	17.017
17	29.367	17.952
18	28.775	18.844
19	28.176	19.698
20	27.572	20.515
21	26.969	21.290
22	26.372	22.019
23	25.777	22.710
24	25.181	23.372
25	24.594	23.991
26	23.991	24.594
27	23.372	25.181
28	22.710	25.777
29	22.019	26.372
30	21.290	26.969
31	20.515	27.572
32	19.699	28.176
33	18.844	28.775
34	17.952	29.367
35	17.018	29.951
36	16.048	30.519
37	15.038	31.070
38	13.986	31.502
39	12.884	32.117
40	11.728	32.610
41	10.513	33.075
42	9.256	33.504
43	8.026	33.906
44	6.824	34.285
45	5.542	34.540
46	4.482	34.975
47	3.338	35.292
48	2.211	35.590
49	1.099	35.872
50	0.000	36.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.352 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 8.000 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	49.142	0.000
2	48.807	1.704
3	48.456	3.444
4	48.082	5.223
5	47.684	7.046
6	47.261	8.919
7	46.805	10.837
8	46.298	12.672
9	45.744	14.407
10	45.152	16.055
11	44.527	17.628
12	43.873	19.140
13	43.195	20.597
14	42.498	21.981
15	41.783	23.301
16	41.051	24.558
17	40.302	25.767
18	39.547	26.912
19	38.785	28.001
20	38.021	29.034
21	37.255	30.018
22	36.493	30.949
23	35.735	31.830
24	34.974	32.672
25	34.227	33.459
26	33.460	34.226
27	32.672	34.974
28	31.830	35.735
29	30.949	36.493
30	30.018	37.255
31	29.035	38.021
32	28.001	38.785
33	26.913	39.547
34	25.767	40.302
35	24.559	41.051
36	23.301	41.783
37	21.981	42.498
38	20.597	43.195
39	19.140	43.873
40	17.628	44.527
41	16.055	45.152
42	14.407	45.744
43	12.672	46.298
44	10.837	46.805
45	8.919	47.261
46	7.046	47.684
47	5.224	48.082
48	3.444	48.456
49	1.704	48.807
50	0.000	49.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.450 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 12.042 DIAS

PUNTO	X (PIFS)	Y (PIES)
1	59.142	0.000
2	58.785	2.393
3	58.407	4.847
4	58.004	7.368
5	57.574	9.966
6	57.097	12.525
7	56.558	14.907
8	55.969	17.149
9	55.338	19.280
10	54.670	21.310
11	53.972	23.226
12	53.245	25.041
13	52.494	26.764
14	51.722	28.396
15	50.925	29.958
16	50.107	31.448
17	49.275	32.864
18	48.438	34.195
19	47.597	35.450
20	46.753	36.533
21	45.906	37.752
22	45.063	38.804
23	44.217	39.803
24	43.362	40.760
25	42.519	41.652
26	41.652	42.519
27	40.760	43.361
28	39.803	44.217
29	38.804	45.063
30	37.752	45.906
31	36.633	46.753
32	35.450	47.597
33	34.195	48.438
34	32.864	49.275
35	31.448	50.107
36	29.958	50.925
37	28.396	51.722
38	26.764	52.494
39	25.041	53.245
40	23.226	53.972
41	21.310	54.670
42	19.280	55.337
43	17.149	55.969
44	14.908	56.558
45	12.525	57.097
46	9.966	57.574
47	7.358	58.004
48	4.847	58.407
49	2.393	58.785
50	0.000	59.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.554 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 16.097 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	67.142	0.000
2	66.784	3.226
3	66.405	6.541
4	65.999	9.956
5	65.547	13.290
6	65.034	16.348
7	64.469	19.200
8	63.860	21.883
9	63.215	24.396
10	62.538	26.753
11	61.828	28.974
12	61.085	31.080
13	60.324	33.061
14	59.548	34.913
15	58.753	36.560
16	57.939	38.306
17	57.103	39.868
18	56.255	41.334
19	55.403	42.706
20	54.548	43.988
21	53.688	45.189
22	52.829	46.309
23	51.964	47.365
24	51.085	48.369
25	50.210	49.305
26	49.305	50.210
27	48.369	51.085
28	47.365	51.964
29	46.309	52.829
30	45.189	53.588
31	43.988	54.548
32	42.706	55.403
33	41.335	56.255
34	39.868	57.103
35	38.306	57.939
36	36.660	58.753
37	34.914	59.548
38	33.061	60.324
39	31.080	61.085
40	28.975	61.828
41	26.754	62.538
42	24.396	63.215
43	21.883	63.859
44	19.201	64.469
45	16.348	65.034
46	13.290	65.547
47	9.957	65.999
48	6.542	66.405
49	3.226	66.784
50	0.000	67.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.684 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 20.477 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	74.142	0.000
2	73.800	4.367
3	73.437	8.862
4	73.038	13.319
5	72.585	17.335
6	72.081	21.019
7	71.541	24.423
8	70.969	27.577
9	70.359	30.526
10	69.728	33.273
11	69.084	35.825
12	68.419	38.208
13	67.731	40.433
14	67.030	42.500
15	66.321	44.424
16	65.597	46.214
17	64.851	47.892
18	64.090	49.445
19	63.312	50.889
20	62.525	52.224
21	61.726	53.461
22	60.923	54.601
23	60.106	55.661
24	59.273	56.555
25	58.438	57.567
26	57.567	58.438
27	56.555	59.273
28	55.661	60.106
29	54.601	60.923
30	53.462	61.726
31	52.225	62.525
32	50.889	63.312
33	49.445	64.090
34	47.892	64.851
35	46.214	65.597
36	44.425	66.321
37	42.500	67.030
38	40.434	67.731
39	38.208	68.418
40	35.825	69.083
41	33.273	69.728
42	30.527	70.359
43	27.578	70.969
44	24.424	71.541
45	21.019	72.081
46	17.335	72.585
47	13.319	73.038
48	8.862	73.437
49	4.367	73.800
50	0.000	74.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.815 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 24.276 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	79.142	0.000
2	78.821	5.639
3	78.477	11.422
4	78.093	16.701
5	77.664	21.416
6	77.211	25.699
7	76.731	29.632
8	76.232	33.262
9	75.730	36.616
10	75.217	39.715
11	74.690	42.581
12	74.168	45.230
13	73.641	47.674
14	73.098	49.921
15	72.538	51.998
16	71.970	53.906
17	71.386	55.668
18	70.782	57.277
19	70.158	58.749
20	69.513	60.091
21	68.843	61.318
22	68.162	62.427
23	67.461	63.440
24	66.736	64.371
25	65.997	65.209
26	65.209	65.997
27	64.371	66.736
28	63.440	67.461
29	62.427	68.162
30	61.318	68.843
31	60.091	69.513
32	58.749	70.158
33	57.278	70.782
34	55.668	71.386
35	53.906	71.970
36	51.998	72.538
37	49.921	73.098
38	47.674	73.641
39	45.230	74.168
40	42.581	74.690
41	39.715	75.217
42	36.616	75.730
43	33.262	76.231
44	29.633	76.731
45	25.700	77.211
46	21.416	77.664
47	16.702	78.093
48	11.423	78.477
49	5.639	78.821
50	0.000	79.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 1.005 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 28.895 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	84.142	0.000
2	84.852	7.653
3	83.543	15.145
4	83.204	21.571
5	82.859	27.268
6	82.507	32.418
7	82.179	37.118
8	81.858	41.422
9	81.568	45.379
10	81.309	49.007
11	81.050	52.332
12	80.832	55.381
13	80.629	58.166
14	80.420	60.697
15	80.205	63.002
16	79.995	65.085
17	79.779	66.971
18	79.531	68.658
19	79.248	70.163
20	78.918	71.501
21	78.546	72.685
22	78.158	73.705
23	77.713	74.610
24	77.223	75.404
25	76.692	76.082
26	76.082	76.592
27	75.404	77.223
28	74.610	77.713
29	73.705	78.158
30	72.685	78.546
31	71.501	78.918
32	70.163	79.248
33	68.659	79.531
34	66.972	79.778
35	65.085	79.995
36	63.002	80.205
37	60.697	80.420
38	58.166	80.529
39	55.381	80.832
40	52.332	81.050
41	49.007	81.309
42	45.379	81.568
43	41.422	81.857
44	37.119	82.179
45	32.419	82.507
46	27.269	82.859
47	21.571	83.203
48	15.146	83.543
49	7.653	83.852
50	0.000	84.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 1.165 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 32.221 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	87.142	0.000
2	86.875	9.518
3	86.596	18.311
4	86.311	25.707
5	86.046	32.246
6	85.830	38.142
7	85.656	43.514
8	85.559	48.431
9	85.508	52.947
10	85.553	57.093
11	85.642	60.890
12	85.782	64.371
13	85.990	67.550
14	86.218	70.431
15	86.442	73.044
16	86.703	75.386
17	86.946	77.493
18	87.183	79.342
19	87.341	80.965
20	87.443	82.362
21	87.455	83.561
22	87.422	84.546
23	87.347	85.337
24	87.176	85.980
25	86.894	86.491
26	86.491	86.894
27	85.980	87.176
28	85.337	87.347
29	84.546	87.422
30	83.561	87.455
31	82.362	87.443
32	80.965	87.341
33	79.343	87.183
34	77.494	86.946
35	75.386	86.703
36	73.044	86.442
37	70.431	86.218
38	67.550	85.990
39	64.371	85.782
40	60.891	85.642
41	57.093	85.553
42	52.947	85.508
43	48.432	85.559
44	43.515	85.656
45	38.143	85.830
46	32.247	86.046
47	25.708	86.311
48	18.311	86.596
49	9.519	86.875
50	0.001	87.142

POSICION EN LA RUPTURA

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 1.231 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 33.452 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	88.142	0.000
2	87.884	10.315
3	87.617	19.500
4	87.360	27.393
5	87.135	34.279
6	86.975	40.487
7	86.887	45.149
8	86.883	51.334
9	86.967	56.108
10	87.155	60.501
11	87.398	64.533
12	87.757	68.250
13	88.160	71.655
14	88.586	74.749
15	89.117	77.559
16	89.651	80.094
17	90.142	82.385
18	90.596	84.405
19	91.067	86.125
20	91.512	87.574
21	91.822	89.804
22	92.034	89.805
23	92.155	90.596
24	92.142	91.214
25	91.981	91.668
26	91.668	91.981
27	91.214	92.142
28	90.596	92.155
29	89.805	92.034
30	88.804	91.822
31	87.574	91.512
32	86.125	91.067
33	84.405	90.596
34	82.385	90.142
35	80.095	89.651
36	77.559	89.117
37	74.749	88.587
38	71.655	88.160
39	68.250	87.757
40	64.534	87.398
41	60.502	87.155
42	56.109	86.967
43	51.334	86.883
44	46.149	86.287
45	40.488	85.975
46	34.280	87.134
47	27.394	87.360
48	19.601	87.617
49	10.316	87.884
50	0.001	88.142

CARACTERISTICAS DEL MODELO.

N = 10
DEL T X = 10.0 PIES
V I S = 1.0 CP
P O R = 0.20
S O D = 0.50
H = 10.0 PIES
Q = 400.0 PCUB/DIA

PERMEABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO X ENTRE LOS NODOS EN MILDARCS-PIES

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
11	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
10	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
9	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
8	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
7	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
6	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
5	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
4	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
3	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
2	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00

PERMEABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO Y ENTRE LOS NODOS EN MILDARCS-PIES

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

PRESIONES EN LOS NODOS EN L P C

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	100.000	98.851	96.553	93.094	88.473	82.411	74.784	64.980	51.841	32.763	1.169
11	101.148	100.000	97.714	94.304	89.760	84.022	76.951	68.306	57.768	45.269	32.763
10	103.446	102.285	100.000	96.648	92.288	86.959	80.686	73.515	65.644	57.768	51.841
9	106.905	105.695	103.351	100.000	95.781	90.834	85.310	79.415	73.515	68.306	64.980
8	111.576	110.239	107.711	104.218	100.000	95.283	90.298	85.310	80.686	76.951	74.784
7	117.588	115.977	113.040	109.165	104.716	100.000	95.283	90.834	86.959	84.022	82.411
6	125.215	123.048	119.313	114.689	109.701	104.716	100.000	95.781	92.288	89.760	88.423
5	135.019	131.694	126.484	120.584	114.689	109.165	104.218	100.000	96.648	94.304	93.094
4	148.158	142.231	134.355	126.484	119.313	113.040	107.711	103.351	100.000	97.714	96.553
3	167.236	154.730	142.231	131.693	123.048	115.977	110.239	105.695	102.285	100.000	98.851
2	198.930	167.236	148.158	135.019	125.215	117.588	111.576	106.905	103.446	101.148	100.000

POSICION INICIAL DEL FRENTE

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	14.142	0.000
2	14.134	0.453
3	14.113	0.906
4	14.076	1.357
5	14.026	1.908
6	13.960	2.257
7	13.881	2.703
8	13.787	3.146
9	13.679	3.587
10	13.557	4.023
11	13.421	4.456
12	13.271	4.884
13	13.108	5.307
14	12.931	5.724
15	12.741	6.136
16	12.538	6.541
17	12.322	6.939
18	12.093	7.331
19	11.852	7.715
20	11.598	8.090
21	11.333	8.458
22	11.056	8.817
23	10.768	9.167
24	10.469	9.507
25	10.159	9.838
26	9.838	10.158
27	9.507	10.469
28	9.167	10.768
29	8.817	11.056
30	8.458	11.333
31	8.090	11.598
32	7.715	11.852
33	7.331	12.093
34	6.939	12.322
35	6.541	12.538
36	6.136	12.741
37	5.724	12.931
38	5.307	13.108
39	4.884	13.271
40	4.456	13.421
41	4.023	13.557
42	3.587	13.679
43	3.146	13.787
44	2.703	13.881
45	2.257	13.960
46	1.808	14.026
47	1.358	14.076
48	0.906	14.113
49	0.453	14.134
50	0.000	14.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.157 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 2.524 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	36.142	0.000
2	35.872	1.099
3	35.590	2.211
4	35.292	3.338
5	34.975	4.481
6	34.640	5.642
7	34.285	6.824
8	33.906	8.026
9	33.504	9.256
10	33.075	10.513
11	32.611	11.728
12	32.117	12.884
13	31.602	13.986
14	31.070	15.037
15	30.519	16.048
16	29.951	17.017
17	29.367	17.952
18	28.775	18.844
19	28.176	19.698
20	27.572	20.515
21	26.969	21.290
22	26.372	22.019
23	25.777	22.710
24	25.181	23.372
25	24.594	23.991
26	23.991	24.594
27	23.372	25.181
28	22.710	25.777
29	22.019	26.372
30	21.290	26.969
31	20.515	27.572
32	19.699	28.176
33	19.844	28.775
34	17.952	29.367
35	17.018	29.951
36	16.048	30.519
37	15.038	31.070
38	13.986	31.602
39	12.884	32.117
40	11.728	32.610
41	10.513	33.075
42	9.256	33.504
43	8.026	33.906
44	6.824	34.285
45	5.642	34.640
46	4.481	34.975
47	3.338	35.292
48	2.211	35.590
49	1.099	35.872
50	0.000	36.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.220 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 5.000 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	49.142	0.000
2	48.807	1.704
3	48.456	3.444
4	48.082	5.223
5	47.684	7.046
6	47.261	8.919
7	46.805	10.837
8	46.298	12.672
9	45.744	14.407
10	45.152	16.055
11	44.527	17.628
12	43.873	19.140
13	43.195	20.597
14	42.498	21.981
15	41.783	23.301
16	41.051	24.558
17	40.302	25.767
18	39.547	26.912
19	38.785	28.001
20	38.021	29.034
21	37.255	30.018
22	36.493	30.949
23	35.735	31.830
24	34.974	32.672
25	34.227	33.459
26	33.460	34.226
27	32.672	34.974
28	31.830	35.735
29	30.949	36.493
30	30.018	37.255
31	29.035	38.021
32	28.001	38.785
33	26.913	39.547
34	25.767	40.302
35	24.558	41.051
36	23.301	41.783
37	21.981	42.498
38	20.597	43.195
39	19.140	43.873
40	17.628	44.527
41	16.055	45.152
42	14.407	45.744
43	12.672	46.298
44	10.837	46.805
45	8.919	47.261
46	7.046	47.684
47	5.224	48.082
48	3.444	48.456
49	1.704	48.807
50	0.000	49.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.281 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 7.526 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	59.142	0.000
2	58.785	2.393
3	58.407	4.847
4	58.004	7.368
5	57.574	9.966
6	57.097	12.525
7	56.558	14.907
8	55.969	17.149
9	55.338	19.280
10	54.670	21.310
11	53.972	23.226
12	53.245	25.041
13	52.494	26.764
14	51.722	28.396
15	50.925	29.958
16	50.107	31.448
17	49.275	32.864
18	48.438	34.195
19	47.597	35.450
20	46.753	36.633
21	45.906	37.752
22	45.063	38.804
23	44.217	39.803
24	43.362	40.760
25	42.519	41.652
26	41.652	42.519
27	40.760	43.361
28	39.803	44.217
29	38.804	45.063
30	37.752	45.906
31	36.633	46.753
32	35.450	47.597
33	34.195	48.438
34	32.864	49.275
35	31.448	50.107
36	29.958	50.925
37	28.396	51.722
38	26.764	52.494
39	25.041	53.245
40	23.226	53.972
41	21.310	54.670
42	19.280	55.337
43	17.149	55.969
44	14.908	56.558
45	12.525	57.097
46	9.966	57.574
47	7.368	58.004
48	4.847	58.407
49	2.393	58.785
50	0.000	59.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.346 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 10.060 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	67.142	0.000
2	66.784	3.226
3	66.405	6.541
4	65.999	9.956
5	65.547	13.290
6	65.034	16.348
7	64.469	19.200
8	63.860	21.883
9	63.215	24.396
10	62.538	26.753
11	61.829	28.974
12	61.085	31.080
13	60.324	33.061
14	59.548	34.913
15	58.753	36.660
16	57.939	38.306
17	57.103	39.868
18	56.255	41.334
19	55.403	42.706
20	54.548	43.988
21	53.688	45.189
22	52.829	46.309
23	51.964	47.365
24	51.085	48.369
25	50.210	49.305
26	49.305	50.210
27	48.369	51.085
28	47.365	51.964
29	46.309	52.829
30	45.189	53.688
31	43.988	54.548
32	42.706	55.403
33	41.335	56.255
34	39.868	57.103
35	38.306	57.939
36	36.660	58.753
37	34.914	59.548
38	33.061	60.324
39	31.080	61.085
40	28.975	61.828
41	26.753	62.538
42	24.396	63.215
43	21.883	63.859
44	19.201	64.469
45	16.348	65.034
46	13.290	65.547
47	9.957	65.999
48	6.542	66.405
49	3.226	66.784
50	0.000	67.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.428 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 12.798 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIÉS)
1	74.142	0.000
2	73.800	4.367
3	73.437	8.862
4	73.038	13.319
5	72.585	17.335
6	72.081	21.019
7	71.541	24.423
8	70.969	27.577
9	70.359	30.526
10	69.728	33.273
11	69.084	35.825
12	68.419	38.208
13	67.731	40.433
14	67.030	42.500
15	66.321	44.424
16	65.597	46.214
17	64.851	47.892
18	64.090	49.445
19	63.312	50.889
20	62.525	52.224
21	61.726	53.461
22	60.923	54.601
23	60.106	55.661
24	59.273	56.655
25	58.438	57.567
26	57.567	58.438
27	56.655	59.273
28	55.661	60.106
29	54.601	60.923
30	53.462	61.726
31	52.225	62.525
32	50.889	63.312
33	49.445	64.090
34	47.892	64.851
35	46.214	65.597
36	44.425	66.321
37	42.500	67.030
38	40.434	67.731
39	38.208	68.418
40	35.825	69.083
41	33.273	69.728
42	30.527	70.359
43	27.578	70.969
44	24.474	71.541
45	21.019	72.081
46	17.335	72.585
47	13.319	73.038
48	8.862	73.437
49	4.367	73.800
50	0.000	74.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.509 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 15.172 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	79.142	0.000
2	78.821	5.639
3	78.477	11.422
4	78.093	16.701
5	77.664	21.416
6	77.211	25.699
7	76.731	29.632
8	76.232	33.262
9	75.730	36.616
10	75.217	39.715
11	74.690	42.581
12	74.168	45.230
13	73.641	47.674
14	73.098	49.921
15	72.538	51.998
16	71.970	53.906
17	71.386	55.668
18	70.782	57.277
19	70.158	58.749
20	69.513	60.091
21	68.843	61.318
22	68.162	62.427
23	67.461	63.440
24	66.736	64.371
25	65.997	65.209
26	65.209	65.997
27	64.371	66.736
28	63.440	67.461
29	62.427	68.162
30	61.318	68.843
31	60.091	69.513
32	58.749	70.158
33	57.278	70.782
34	55.668	71.386
35	53.906	71.970
36	51.998	72.538
37	49.921	73.098
38	47.674	73.641
39	45.230	74.168
40	42.581	74.690
41	39.715	75.217
42	36.616	75.730
43	33.262	76.231
44	29.633	76.731
45	25.700	77.211
46	21.416	77.664
47	16.702	78.093
48	11.423	78.477
49	5.639	78.821
50	0.000	79.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.628 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 18.059 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	84.142	0.000
2	83.852	7.653
3	83.543	15.145
4	83.204	21.571
5	82.859	27.268
6	82.507	32.418
7	82.179	37.118
8	81.858	41.422
9	81.568	45.379
10	81.309	49.007
11	81.050	52.332
12	80.832	55.381
13	80.629	58.165
14	80.420	60.697
15	80.205	63.002
16	79.995	65.085
17	79.779	66.971
18	79.531	68.658
19	79.248	70.163
20	78.918	71.501
21	78.546	72.685
22	78.158	73.705
23	77.713	74.610
24	77.223	75.404
25	76.692	76.082
26	76.082	76.692
27	75.404	77.223
28	74.610	77.713
29	73.705	78.158
30	72.685	78.546
31	71.501	78.918
32	70.163	79.248
33	68.659	79.531
34	66.972	79.778
35	65.085	79.995
36	63.002	80.205
37	60.697	80.420
38	58.166	80.629
39	55.381	80.832
40	52.332	81.050
41	49.007	81.309
42	45.379	81.568
43	41.422	81.857
44	37.119	82.179
45	32.419	82.507
46	27.269	82.859
47	21.571	83.203
48	15.145	83.543
49	7.653	83.852
50	0.000	84.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.728 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 20.138 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	87.142	0.000
2	86.875	9.518
3	86.596	18.311
4	86.311	25.707
5	86.046	32.246
6	85.830	38.142
7	85.656	43.514
8	85.559	48.431
9	85.508	52.947
10	85.553	57.093
11	85.642	60.890
12	85.782	64.371
13	85.990	67.550
14	86.218	70.431
15	86.442	73.044
16	86.703	75.386
17	86.946	77.493
18	87.193	79.342
19	87.341	80.965
20	87.443	82.362
21	87.455	83.561
22	87.422	84.546
23	87.347	85.337
24	87.176	85.980
25	86.894	86.491
26	86.491	86.894
27	85.980	87.176
28	85.337	87.347
29	84.546	87.422
30	83.561	87.455
31	82.362	87.443
32	80.965	87.341
33	79.343	87.183
34	77.494	86.946
35	75.385	86.703
36	73.044	86.442
37	70.431	86.218
38	67.550	85.990
39	64.371	85.782
40	60.891	85.542
41	57.093	85.553
42	52.947	85.508
43	48.432	85.559
44	43.515	85.556
45	38.143	85.830
46	32.247	86.046
47	25.708	86.311
48	18.311	86.596
49	9.519	86.875
50	0.001	87.142

POSICION EN LA RUPTURA

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.769 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 20.908 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	88.142	0.000
2	87.884	10.315
3	87.617	19.600
4	87.360	27.393
5	87.135	34.279
6	86.975	40.487
7	86.887	46.149
8	86.883	51.334
9	86.967	56.108
10	87.155	60.501
11	87.398	64.533
12	87.757	68.250
13	88.160	71.555
14	88.586	74.749
15	89.117	77.559
16	89.651	80.094
17	90.142	82.385
18	90.596	84.405
19	91.067	86.125
20	91.512	87.574
21	91.822	88.804
22	92.034	89.805
23	92.155	90.596
24	92.142	91.214
25	91.981	91.668
26	91.668	91.981
27	91.214	92.142
28	90.596	92.155
29	89.805	92.034
30	88.804	91.822
31	87.574	91.512
32	86.125	91.067
33	84.405	90.596
34	82.385	90.142
35	80.095	89.651
36	77.559	89.117
37	74.749	88.587
38	71.555	88.160
39	68.250	87.757
40	64.534	87.398
41	60.502	87.155
42	56.109	86.967
43	51.334	86.883
44	46.149	86.887
45	40.488	86.975
46	34.280	87.134
47	27.394	87.360
48	19.601	87.617
49	10.316	87.884
50	0.001	88.142

C A R A C T E R I S T I C A S D E L M O D E L O

N = 10
M = 10

D F L T X = 10.0 P I E S
V I S = 1.0 C P

P O R = 0.20
S O D = 0.50

H = 10.0 P I E S
Q = 400.0 P C U B / D I A

PRESIONES EN LOS NODOS EN L P C

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	401.707	400.802	398.424	396.767	394.469	391.365	387.861	372.086	362.907	360.584	349.499
11	402.007	401.141	399.236	397.605	394.531	390.989	386.253	376.542	370.352	366.193	360.591
10	403.324	402.365	400.992	399.011	395.757	392.400	388.267	382.281	376.513	373.802	370.752
9	404.461	403.682	402.205	400.433	398.955	392.914	390.717	387.534	385.272	380.941	378.626
8	406.063	406.259	404.488	402.682	399.895	396.460	393.503	390.788	388.415	385.459	383.996
7	411.963	411.195	410.183	405.510	402.228	399.610	397.051	394.263	391.729	390.434	389.288
6	415.316	414.571	412.928	407.407	404.406	402.416	399.984	397.471	395.117	393.344	391.550
5	421.835	419.507	416.899	410.433	408.425	404.878	401.706	399.406	397.396	396.008	395.434
4	422.799	426.736	420.633	414.617	409.813	407.593	404.679	401.825	399.824	398.187	397.673
3	448.601	433.706	424.644	418.333	412.805	409.181	405.939	402.770	400.841	399.309	398.470
2	468.237	440.380	427.731	418.405	413.500	410.579	406.116	403.834	402.078	399.868	399.323

VELOCIDADES EN SFNTIDO X EN PCUB/DIA/PCUA

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	0.00000	0.57117	1.34046	2.06500	2.56397	2.40533	3.35802	3.94771	18.01441	25.45494	25.45494
11	0.00000	0.87673	1.17480	1.41409	2.30256	3.66692	6.17079	8.30114	7.69495	6.94931	0.00000
10	0.00000	0.84639	1.48566	2.51825	3.97432	4.62139	4.48243	4.83465	4.15820	3.55434	0.00000
9	0.00000	1.10625	2.00497	2.10804	2.49785	2.21544	3.23409	4.04867	4.48485	3.36424	0.00000
8	0.00000	0.74753	1.86727	2.68870	4.33080	4.95485	4.84554	4.42725	4.04673	2.79627	0.00000
7	0.00000	0.84487	2.78795	4.15316	4.01330	4.34038	4.22972	3.28365	2.18077	1.27402	0.00000
6	0.00000	1.32235	3.06011	4.44899	4.34273	3.91755	3.36385	2.92606	2.41572	1.29773	0.00000
5	0.00000	1.74812	5.59826	4.82602	3.77929	3.50783	3.89505	3.47748	1.93522	1.02411	0.00000
4	0.00000	5.38908	5.36839	5.64897	5.00016	3.81752	3.28503	2.53445	2.01424	1.29320	0.00000
3	0.00000	11.17015	10.21410	7.11662	5.50185	4.67081	2.94130	1.53243	1.14984	0.78766	0.00000
2	14.09757	14.09757	6.95283	5.17828	4.33333	3.38730	2.77414	2.10822	1.38060	0.74086	0.00000

VELOCIDADES EN SFNTIDO Y EN PCUB/DIA/PCUA

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	9.75772
11	1.22024	1.31777	0.81676	0.99307	2.03123	1.08099	1.74767	3.04885	3.09865	5.86830	9.75772
10	1.88264	2.02592	1.32364	2.52653	2.02398	1.87788	2.19198	3.23327	3.35339	5.89400	6.36873
9	2.55543	3.14552	2.30404	3.20474	2.54105	2.52588	2.81734	3.61796	6.50818	10.81664	13.02744
8	2.66744	3.44842	1.64251	3.54882	2.65979	2.28405	3.49956	3.82984	8.32452	8.45627	8.84492
7	1.08566	4.45357	2.84283	5.74008	2.51842	2.62061	3.43806	4.69153	5.21387	4.58365	3.44963
6	2.47618	6.66013	6.00019	5.18554	2.13188	3.73330	3.24653	5.47149	3.97432	3.97715	2.56397
5	3.02742	7.30300	8.38787	6.03252	4.98826	4.53072	2.47070	2.21088	2.27455	2.45606	1.25151
4	7.00048	8.51175	9.77814	4.73699	3.86681	3.32755	2.65945	1.74793	1.37954	1.67829	1.85111
3	19.22296	13.64419	9.81583	2.42066	1.02010	1.01385	0.94688	1.10625	1.11570	1.18359	1.29813
2	19.22296	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

POSICION INICIAL DEL FRENTE

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	14.142	0.000
2	14.134	0.453
3	14.113	0.906
4	14.076	1.357
5	14.026	1.808
6	13.960	2.257
7	13.881	2.703
8	13.787	3.146
9	13.679	3.587
10	13.557	4.023
11	13.421	4.456
12	13.271	4.884
13	13.108	5.307
14	12.931	5.724
15	12.741	6.136
16	12.538	6.541
17	12.322	6.939
18	12.093	7.331
19	11.852	7.715
20	11.598	8.090
21	11.333	8.458
22	11.056	8.817
23	10.768	9.167
24	10.469	9.507
25	10.159	9.838
26	9.838	10.158
27	9.507	10.469
28	9.167	10.768
29	8.817	11.056
30	8.458	11.333
31	8.090	11.598
32	7.715	11.852
33	7.331	12.093
34	6.939	12.322
35	6.541	12.538
36	6.136	12.741
37	5.724	12.931
38	5.307	13.108
39	4.884	13.271
40	4.456	13.421
41	4.023	13.557
42	3.587	13.679
43	3.146	13.787
44	2.703	13.881
45	2.257	13.960
46	1.808	14.026
47	1.358	14.076
48	0.906	14.113
49	0.453	14.134
50	0.000	14.142

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.196 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 2.686 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	37.142	0.000
2	37.900	2.480
3	31.508	4.801
4	34.244	7.003
5	24.857	9.094
6	35.385	11.137
7	35.539	13.173
8	35.462	15.114
9	35.246	16.952
10	34.929	18.700
11	34.531	20.374
12	34.056	21.958
13	33.526	23.437
14	32.966	24.846
15	32.397	26.164
16	31.818	27.402
17	31.255	28.560
18	30.702	29.635
19	30.178	30.586
20	29.663	31.455
21	29.165	32.192
22	28.684	32.838
23	28.203	33.390
24	27.723	33.868
25	27.241	34.286
26	26.747	34.651
27	26.229	34.961
28	25.701	35.245
29	25.117	35.488
30	24.514	35.703
31	23.864	35.890
32	23.170	36.036
33	22.402	36.152
34	21.580	36.228
35	20.688	36.256
36	19.718	36.241
37	18.690	36.211
38	17.597	36.160
39	16.434	36.080
40	15.203	35.964
41	13.898	35.796
42	12.523	35.552
43	11.073	35.189
44	9.549	34.653
45	8.002	34.086
46	6.438	33.522
47	4.857	32.963
48	3.256	32.414
49	1.637	31.872
50	0.000	31.342

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.242 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 5.100 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	43.142	0.000
2	44.610	3.416
3	45.925	6.504
4	47.126	9.265
5	47.963	12.336
6	48.020	14.037
7	47.741	19.898
8	47.300	23.462
9	46.715	26.477
10	45.909	29.074
11	45.192	31.392
12	44.443	33.302
13	43.792	34.825
14	43.228	36.099
15	42.716	37.182
16	42.243	38.156
17	41.785	39.052
18	41.334	39.897
19	40.895	40.683
20	40.423	41.549
21	39.929	42.397
22	39.447	43.229
23	38.944	44.020
24	38.424	44.781
25	37.898	45.496
26	37.343	46.180
27	36.757	46.821
28	36.144	47.427
29	35.457	48.008
30	34.735	48.559
31	33.939	49.017
32	33.069	49.399
33	32.081	49.674
34	30.904	49.788
35	29.780	49.695
36	28.463	49.548
37	27.038	49.357
38	25.497	49.130
39	23.837	48.894
40	22.050	48.714
41	20.112	48.748
42	18.071	48.899
43	15.956	48.981
44	13.787	48.926
45	11.627	48.529
46	9.576	47.208
47	7.485	45.359
48	5.235	43.343
49	2.777	41.178
50	0.000	38.950

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.301 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 7.568 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	52.142	0.000
2	54.346	4.368
3	56.184	8.304
4	57.578	12.102
5	57.865	17.010
6	57.474	23.072
7	56.993	28.421
8	56.416	33.017
9	55.719	36.542
10	55.060	39.297
11	54.471	41.247
12	53.958	42.663
13	53.509	43.711
14	53.107	44.523
15	52.729	45.194
16	52.366	45.800
17	51.997	45.366
18	51.613	45.936
19	51.213	47.524
20	50.767	48.199
21	50.294	48.888
22	49.799	49.626
23	49.279	50.353
24	48.734	51.132
25	48.179	51.900
26	47.599	52.720
27	46.995	53.531
28	46.391	54.368
29	45.699	55.228
30	44.969	56.058
31	44.140	56.898
32	43.194	57.673
33	42.073	58.416
34	40.802	59.069
35	39.341	59.572
36	37.710	59.888
37	35.928	59.993
38	34.012	59.816
39	31.979	59.294
40	29.799	58.310
41	27.367	57.193
42	24.606	56.286
43	21.477	55.080
44	18.136	56.915
45	14.877	57.603
46	11.687	57.506
47	9.299	55.598
48	6.623	52.714
49	3.618	49.279
50	0.000	44.891

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.353 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 10.204 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	60.142	0.000
2	62.447	5.613
3	64.010	10.681
4	65.389	16.179
5	66.262	23.201
6	66.877	29.714
7	66.679	36.040
8	65.592	42.122
9	64.970	46.048
10	64.744	48.670
11	64.573	50.501
12	64.378	51.793
13	64.166	52.726
14	63.940	53.433
15	63.704	54.002
16	63.465	54.505
17	63.209	54.966
18	62.932	55.424
19	62.635	55.892
20	62.302	56.428
21	61.944	56.973
22	61.567	57.565
23	61.159	58.150
24	60.735	58.784
25	60.293	59.413
26	59.832	60.085
27	59.340	60.746
28	58.804	61.436
29	58.153	62.131
30	57.358	62.820
31	56.361	63.518
32	55.092	64.213
33	53.521	64.924
34	51.723	65.620
35	49.759	66.260
36	47.651	66.756
37	45.378	67.098
38	42.945	67.256
39	40.323	67.224
40	37.550	66.893
41	34.604	66.135
42	31.377	64.799
43	27.661	63.054
44	23.326	62.238
45	18.911	63.853
46	14.931	65.281
47	11.461	64.737
48	8.120	61.674
49	4.481	57.117
50	0.000	50.464

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.411 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 12.518 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	66.142	0.000
2	67.840	7.080
3	69.119	13.511
4	71.231	20.203
5	73.304	27.995
6	74.440	36.406
7	73.709	47.078
8	73.086	52.968
9	73.151	56.331
10	73.462	58.664
11	73.709	60.312
12	73.824	61.456
13	73.824	62.249
14	73.741	62.817
15	73.624	63.252
16	73.477	63.641
17	73.295	64.004
18	73.092	64.363
19	72.866	64.730
20	72.579	65.155
21	72.265	65.586
22	71.913	66.058
23	71.496	66.545
24	71.045	67.097
25	70.522	67.628
26	69.951	68.184
27	69.287	68.695
28	68.550	69.218
29	67.667	69.720
30	66.601	70.181
31	65.274	70.611
32	63.592	70.996
33	61.514	71.379
34	59.127	71.804
35	56.532	72.205
36	53.936	72.560
37	51.452	72.859
38	49.077	73.033
39	46.549	73.034
40	43.786	72.849
41	40.657	72.484
42	37.100	71.768
43	33.054	70.427
44	28.361	68.494
45	23.430	68.896
46	18.700	71.177
47	14.377	71.554
48	10.008	69.126
49	5.362	64.135
50	0.000	55.449

NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.493 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 15.256 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	72.142	0.000
2	72.496	9.491
3	74.563	17.351
4	77.841	24.990
5	80.163	34.637
6	81.308	48.384
7	82.353	63.608
8	83.708	70.851
9	84.478	74.224
10	85.032	76.247
11	85.347	77.474
12	85.462	78.184
13	85.469	78.618
14	85.389	78.858
15	85.275	79.003
16	85.131	79.106
17	84.955	79.177
18	84.757	79.234
19	84.538	79.284
20	84.298	79.330
21	83.943	79.376
22	83.582	79.443
23	83.157	79.483
24	82.697	79.552
25	82.167	79.585
26	81.580	79.682
27	80.901	79.774
28	80.165	79.870
29	79.274	79.959
30	78.207	80.003
31	76.864	80.020
32	75.105	79.950
33	72.843	79.800
34	70.127	79.589
35	67.168	79.390
36	64.264	79.266
37	61.562	79.239
38	59.020	79.205
39	56.349	79.083
40	53.374	78.872
41	49.905	78.605
42	45.754	78.186
43	40.601	77.574
44	34.695	76.574
45	29.171	76.179
46	23.782	76.893
47	18.390	77.572
48	13.117	76.666
49	7.024	72.218
50	0.000	62.385

POSICION EN LA RUPTURA

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.576 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 17.430 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	76.142	0.000
2	75.637	11.926
3	79.074	20.514
4	82.222	29.301
5	84.686	42.290
6	86.618	61.523
7	90.593	80.847
8	92.276	85.245
9	93.311	87.396
10	94.093	88.969
11	94.609	90.045
12	94.913	90.739
13	95.052	91.128
14	95.069	91.294
15	95.034	91.355
16	94.966	91.360
17	94.865	91.318
18	94.746	91.251
19	94.608	91.165
20	94.427	91.041
21	94.220	90.897
22	93.987	90.747
23	93.697	90.537
24	93.380	90.337
25	92.857	90.071
26	92.303	89.830
27	91.654	89.536
28	90.949	89.215
29	90.135	88.901
30	89.148	88.499
31	87.938	88.083
32	86.323	87.515
33	84.274	87.017
34	81.781	86.621
35	78.844	86.218
36	75.739	85.713
37	72.672	85.169
38	69.669	84.569
39	66.640	83.986
40	63.394	83.414
41	59.729	82.910
42	55.254	82.382
43	49.373	81.940
44	42.086	81.476
45	34.845	81.714
46	28.247	81.440
47	21.708	80.844
48	15.650	80.837
49	8.667	77.780
50	0.001	68.074

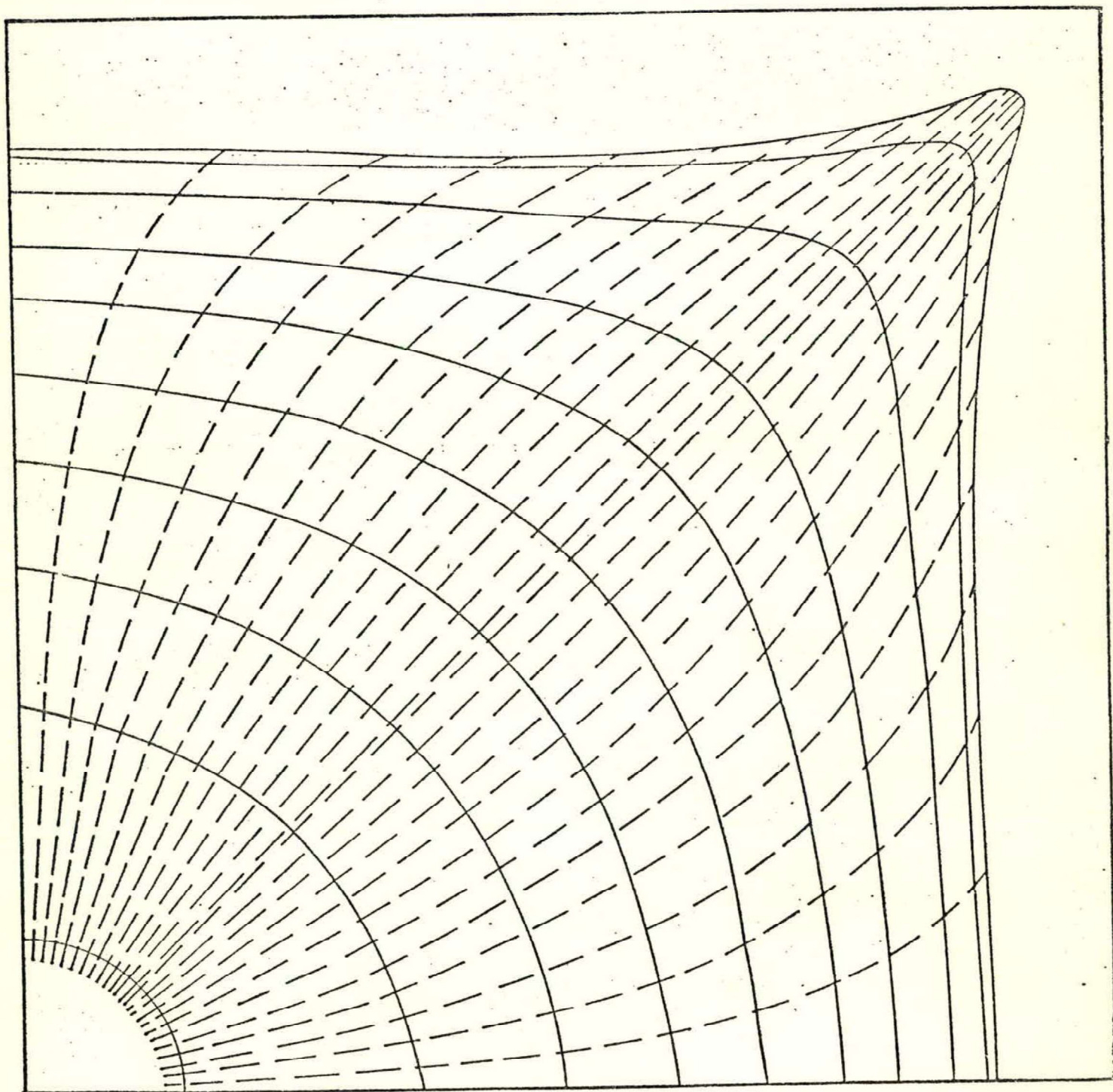


GRAFICO 1. LINEAS DE FLUJO (Cortadas) Y POSICIONES DEL FRENTE (Líneas
contínuas) PARA UN MODELO CON CARACTERISTICAS HOMOGENEAS.

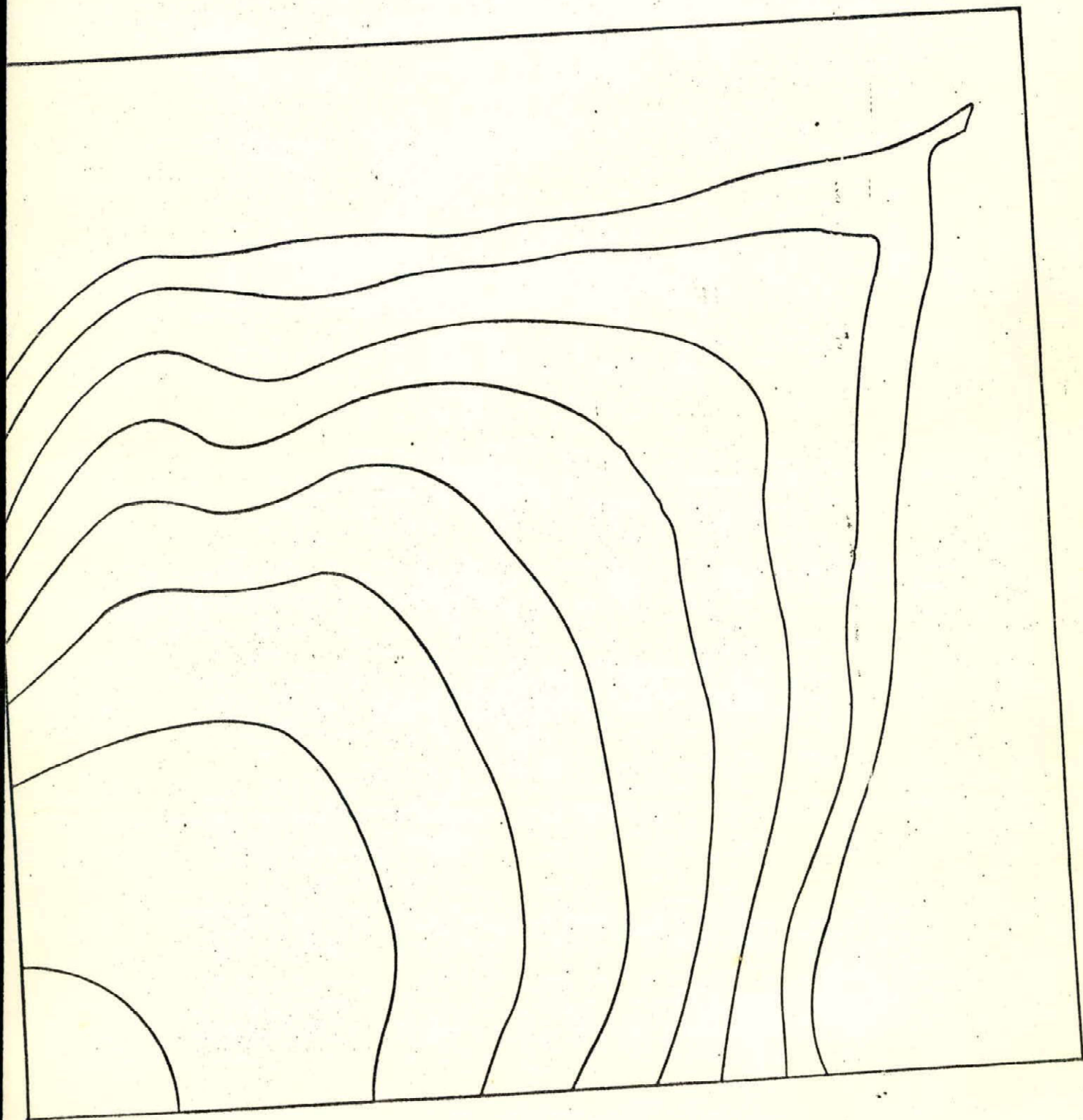


GRAFICO 2. POSICIONES DEL FRENTE PARA UN MODELO CON CARACTERISTICAS HETEROGENEAS EN SU PRODUCTO PERMEABILIDAD - ESPESOR.

BIBLIOGRAFIA

1. Mc Carty D.G. y Barfield E.C., "THE USE OF HIGH-SPEED COMPUTERS PREDICTING FLOOD-OUT PATTERNS", *Numerical - Simulation, SPE Reprint Series*, Pag. 169.
2. Van Poolen H.K., Bixel H.C. y Jargon G.R., "RESERVOIR MODELING", *The Petroleum Publishing Company, Copiado de The Oil and Gas Journal*.
3. Douglas Jim Jr., Peaceman D.W., Rachford H.H. Jr., "A METHOD FOR CALCULATING MULTI-DIMENSIONAL INMISCIBLE - DISPLACEMENT", *Petroleum Transactions, AIME, Vol. 216, 1959*, Pag. 297.
4. Smith G.D. "NUMERICAL SOLUTION OF PARTIAL DIFERENCIAL EQUATIONS".
5. Breitenbach E.A., Van Poolen K.H., "SOLUTION OF THE INMISCIBLE FLUID FLOW SIMULATION EQUATIONS", *Numerical Simulation, SPE Reprint Series*, Pag. 16.
6. Odeh A.S., Bradley H.B., y Heller J.P., "SCALE LIMITATIONS IN POTENTIOMETRIC MODEL CONSTRUCTION", *Trans. AIME (1956) 207*, Pag. 200.
7. Peaceman D.W. and Rachford H.H. Jr., "THE NUMERICAL - SOLUTION OF PARABOLIC AND ELLIPTIC DIFFERENTIAL EQUA-

TIONS", J. Soc. Ind. Appl. Mathem. (1955) 3,28.

8. Carnahan, Luther, Wilkes, "APPLIED NUMERICAL METHODS".
9. Farouq-Ali S.M., "NUMERICAL RESERVOIR SIMULATIONS".
10. Peaceman N. Donald, "FUNDAMENTAL OF RESERVOIR SIMULATIONS", Lecture-Notes.