



14
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

APLICACION DE LA INTELIGENCIA
ARTIFICIAL AL ANALISIS DE PRUEBAS
DE PRESION EN POZOS GEOTERMICOS

FALLA DE ORIGEN.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A

RAMON

HERNANDEZ

ANGELES



DIRECTOR DE TESIS:
DR. EDUARDO GONZALEZ PARTIDA

MEXICO, D. F.

1995

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-003

SR. RAMON HERNANDEZ ANGELES
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Eduardo González Partida, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

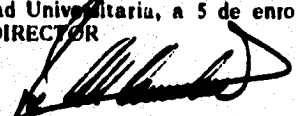
APLICACION DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL AL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION EN POZOS GEOTERMICOS

- INTRODUCCION
- I ENERGIA GEOTERMICA
- II PRUEBAS DE PRESION
- III SISTEMAS EXPERTOS
- IV DESCRIPCION DEL SISTEMA EXPERTO ANAPPRES
- V APLICACION DE ANAPPRES AL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION
- CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 5 de enero de 1995
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS'EGLM'tjh.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE INGENIERIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

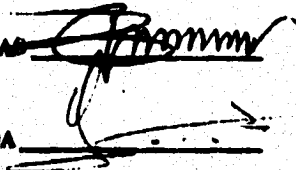
TESIS: APLICACION DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL AL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION EN POZOS GEOTERMICOS.

REALIZADA POR: RAMON HERNANDEZ ANGELES

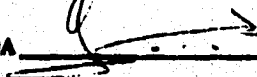
DIRECTOR DE TESIS: DR. EDUARDO GONZALEZ PARTIDA

FIRMAS DE CONFORMIDAD DEL JURADO:

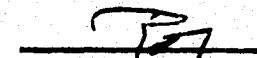
PRESENTE: ING. MANUEL VILLAMAR VIGUERA



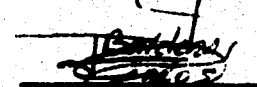
VOCAL: DR. EDUARDO GONZALEZ PARTIDA



SECRETARIO: M. I. RAFAEL RODRIGUEZ NIETO



1º SUPLENTE: M. I. CARLOS BALDERAS JOERS



2º SUPLENTE: ING. MARIO BECERRA ZEPEDA



CIUDAD UNIVERSITARIA. D. F., OCTUBRE DE 1995

A mi esposa, Olga, quien ha compartido los sacrificios y momentos difíciles, y sin cuyo apoyo moral, tal vez, no lo hubiera logrado.

Con amor, para mis hijos: Anel, Alejandro y Oscar, los que me han visto avanzar poco a poco. Y a quienes deseo inculcarles la idea de que todo es posible.

Con cariño a mis padres, hermanos y demás familiares, quienes siempre tuvieron esperanza en mí y me brindaron apoyo de alguna manera.

Al M. I. Victor Manuel Arellano Gómez y al Dr. Eduardo Gonzalez Partida, por su desinteresada ayuda durante la elaboración de este trabajo.

A todos mis profesores, por sus enseñanzas.

A mis amigos, porque con su amistad, se hace más ameno el camino.

Un hombre alcanzó la suma del poder de su nación, y apesadumbrado de las miserias que veía, cifró su felicidad en lograrla para sus compatriotas.

Meditó lo que haría, y decidió que se le entregaran todos los bienes materiales para repartirlos. Así se hizo, los distribuyó con extremada equidad entre todos y suponiendo cumplida su misión, se alejó del país.

Pero pronto volvieron las desigualdades y aflicciones, y anhelaron el regreso de quien les prometiera la felicidad.

Por fin un día entro en la capital un pobre viejo encorvado, y ante la ansiosa muchedumbre, habló de esta manera:

— Al repartir las cosas creí haceros iguales y dichosos, y no hice más que perturbar las leyes de la vida, que dan la compensación a cada esfuerzo, que empujan al indolente, que liman con el dolor las asperezas, que restablecen la justicia, a través de aparentes contradicciones... Y ahora estoy nuevamente entre ricos y pobres, amos y esclavos, sinceros y traidores, laboriosos y haraganes, ingeniosos y torpes, sangradores y desangrados.

Y juntando las manos cual si rezara, exclamó:

— ¡Los verdaderos bienes no pueden ser repartidos! ¡Nadie cambiará nuestro destino, sino nosotros mismos! ¡Conseguid por vuestro propio esfuerzo la inteligencia y la virtud, y entonces seréis iguales; entonces, sí, tendréis todos la felicidad posible en este mundo!

Constancio C. Vigil
(El Erial)

Quando se sabe una cosa, sostener que se sabe y cuando no se sabe, admitir que no se sabe: éste es el verdadero conocimiento.

Confucio

**APLICACION DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL AL
ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION EN POZOS GEOTERMICOS**

CONTENIDO

<u>CAPITULO</u>	<u>Pag.</u>
INTRODUCCION.	3
I. ENERGIA GEOTERMICA	
1.1 - Introducción.	5
1.2 - Geotermia.	5
1.3 - Origen de los sistemas geotérmicos.	6
1.4 - Tipos de sistemas geotérmicos.	8
1.5 - Usos de la energía geotérmica.	10
1.6 - Etapas de un proyecto geotérmico tipo.	15
1.7 - La geotermia en México.	19
1.8 - Geotermia en el mundo.	27
1.9 - Conclusiones.	31
II. PRUEBAS DE PRESION	
II.1 - Introducción.	32
II.2 - Conceptos basicos relacionados con el análisis de pruebas de presión.	32
II.3 - Medición de presiones subsuperficiales.	34
II.4 - Pruebas de presión.	38
II.4.1 - Pruebas de presión de un sólo pozo.	38
II.4.2 - Pruebas de presión en pozos múltiples.	45
II.4.3 - Pruebas de presión en pozos geotérmicos de vapor.	63
II.5 - Analisis de pruebas de presión con curvas tipo.	63
II.6 - Conclusiones.	61
III. SISTEMAS EXPERTOS.	
III.1 - Introducción.	62
III.2 - Inteligencia Artificial.	63
III.2.1 - El nacimiento de la Inteligencia Artificial.	64
III.2.2 - Áreas de la Inteligencia Artificial.	68
III.2.3 - Técnicas de la Inteligencia Artificial.	69

III.2.4. - Desarrollo de sistemas de Inteligencia Artificial.	71
III.2.5. - Los lenguajes de la Inteligencia Artificial.	73
III.2.6. - Tendencias Futuras.	75
III.3 - Sistemas expertos.	76
III.3.1. - Ingeniería del conocimiento.	78
III.3.2. - Sistemas expertos básicos.	79
III.3.3. - Los sistemas expertos en la realidad.	80
III.3.4. - Construcción de un sistema experto.	81
III.3.5. - Interacción con un sistema experto.	85
III.3.6. - Arquitectura de un sistema experto.	86
III.4 - Conclusión.	89
IV. DESCRIPCION DEL SISTEMA EXPERTO ANAPPRES.	
IV.1 - Introducción.	92
IV.2 - Sistema experto ANAPPRES.	92
IV.3 - Hardware y software.	94
IV.4 - Arquitectura de ANAPPRES.	94
IV.4.1 - Interfase hombre-máquina.	95
IV.4.2 - Módulo de cálculo.	97
IV.4.3 - Base de conocimientos.	108
IV.4.4 - Máquina de inferencias.	111
IV.4.5 - Módulo de explicación.	111
IV.4.6 - Procedimiento de análisis.	111
IV.5 - Conclusiones.	115
V. APLICACION DE ANAPPRES AL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION.	
V.1 - Introducción.	116
V.2 - Prueba de interferencia en un campo petrolero.	116
V.3 - Prueba de interferencia en un campo geotérmico.	131
V.4 - Curva de Theis.	140
V.5 - Conclusiones.	145
CONCLUSIONES .	148
BIBLIOGRAFIA.	150

INTRODUCCION

La República Mexicana es un lugar privilegiado en el mundo tanto por sus recursos petroleros como por su potencial en energía geotérmica. Para explotar y administrar adecuadamente estos recursos, es necesario evaluar las reservas de calor y/o fluidos de los yacimientos correspondientes, así como predecir las respuestas de los mismos bajo diferentes políticas de explotación. Para efectuar la evaluación del potencial de un campo, se requiere del conocimiento realista tanto de las propiedades petrofísicas de las formaciones del yacimiento (permeabilidad, porosidad, etc.), como de la detección y localización de accidentes hidrológicos que puedan actuar como barreras o como regiones de recarga de fluidos. Esta valiosa información se obtiene del análisis de pruebas de presión en pozos. Una prueba de presión consiste básicamente en registrar las variaciones del gasto y la presión en el fondo de uno o varios pozos.

Para poder cumplir con los planes de expansión tanto en materia petrolera como en energía geotérmica, será necesario desarrollar nuevos campos e incrementar el grado de desarrollo de los que actualmente se encuentran en explotación, para ésto se requiere, por una parte, elevar la cantidad de especialistas de que se dispone actualmente y por otra parte, el desarrollo de tecnologías que faciliten la labor de estos especialistas. Con este fin se desarrolló y validó un sistema experto computarizado con capacidad para analizar tanto pruebas de presión de interferencia, en las que intervienen cualquier número de pozos de producción (inyección) y cualquier número de pozos de observación, como pruebas de un sólo pozo. El sistema experto **ANAPPRES** (**AN**alizador de **P**uebas de **PRES**ión), es una poderosa herramienta tecnológica que permite al usuario no especializado analizar pruebas de presión con la confiabilidad de un especialista, y eventualmente adquirir una destreza análoga a la del experto mediante la observación del comportamiento del sistema.

Introducción

Por otra parte, es bien conocido que los sistemas expertos se han utilizado con éxito en áreas tales como diagnóstico médico, configuración de computadoras, etc. Sin embargo, poco se había hecho en aplicaciones en el campo de la ingeniería, en las que además del conocimiento heurístico, se requiere del empleo de métodos numéricos o de cálculo. ANAPPRES, fue probablemente uno de los primeros sistemas expertos en el mundo en los que se acoplaron con éxito modelos matemáticos, técnicas de optimización y conocimientos heurísticos.

En este trabajo se presenta el análisis de varias pruebas de presión efectuadas tanto en campos geotérmicos como petroleros, en los cuales se utilizó dicho sistema experto, asimismo se mencionan las bases sobre las que fué desarrollado. Este trabajo se dividió en cinco capítulos: En el primero se presentan algunos aspectos generales sobre energía geotérmica; en el segundo capítulo, con el objeto de facilitar la lectura de este trabajo a aquellas personas que no están familiarizadas con el análisis de pruebas de presión se da una breve explicación sobre las pruebas de presión más comúnmente tratadas en la literatura; en el tercero se presentan las generalidades sobre inteligencia artificial así como su relación con los sistemas expertos y la estructura de éstos; en el cuarto capítulo, se describe en detalle la arquitectura del sistema experto ANAPPRES; en el quinto capítulo, con el objeto de validar los resultados y diagnósticos del sistema experto y demostrar su funcionamiento, se presenta el análisis de tres problemas. Por último se presentan las conclusiones y la nomenclatura de las variables aquí utilizadas.

CAPITULO I

ENERGIA GEOTERMICA

I.1.- INTRODUCCION.

Dentro del problema que constituye la obtención de energéticos, especialmente en los países en desarrollo carentes de energéticos fósiles, como los hidrocarburos o el carbón mineral, la energía geotérmica es una alternativa para la generación de electricidad. Su uso se va extendiendo a medida que se crea tecnología nueva en la exploración, en la perforación dentro de altas temperaturas, en el control de los fluidos de perforación, etcétera. Para la utilización de éste recurso geotérmico se debe tener un conocimiento de la cantidad y facilidad de extracción de la energía en cada lugar reconocido a fin de realizar estimaciones económicas y de factibilidad técnica.

I.2.- GEOTERMIA.

El término geotermia se refiere en sentido amplio al calor natural existente en el interior de la Tierra, independientemente de los factores que intervengan en sus manifestaciones superficiales. Este calor fluye por conducción directa a través de las rocas o bien es transportado por fluidos que ascienden por las fracturas hasta zonas más o menos profundas para constituir los yacimientos geotérmicos. El conjunto, fuente de calor, fluido y zona cortical donde se almacena o circula el fluido constituyen el sistema geotérmico.

Desde un punto de vista práctico el desarrollo de la geotermia se ha evocado a conocer factores tan importantes como: la cantidad de energía almacenada, la cantidad de energía recuperable y el grado de dificultad de obtención de esa energía.

La denominación «*campo geotérmico*» implica consideraciones que afectan la realización o viabilidad de una explotación rentable. Beneficiarse de la energía geotérmica significa aprovechar el calor que existe debajo de la superficie de la tierra. En algunas áreas el calor es suficiente para generar vapor, pero en la mayoría de los campos geotérmicos el agua mantiene una forma líquida. Esta agua atrapada en yacimientos subterráneos posteriormente puede ser extraída por medio de pozos.

1.3.- ORIGEN DE LOS SISTEMAS GEOTERMICOS.

El origen de los sistemas geotérmicos está relacionado con el movimiento de las placas oceánicas y continentales, las cuales al chocar o separarse constituyen regiones geológicamente activas en las cuales se presentan los fenómenos de subducción de placas o de debilidad cortical. En el primer caso, la colisión e introducción de una placa por debajo de otra produce elevadas temperaturas formándose magma que puede llegar a la superficie para crear volcanes. En el segundo caso, al existir placas con movimiento divergente, el magma del manto puede llegar a la superficie originando vulcanismo.

El calor requerido para la formación de un sistema geotérmico, puede ser suministrado por una masa de magma de alta temperatura situada en la corteza terrestre ya sea como una intrusión en proceso de enfriamiento o bien como una cámara magmática que ha alimentado un volcán o una caldera. Este calor puede almacenarse en la roca o en acuíferos localizados a pocos kilómetros de profundidad dando origen a yacimientos geotérmicos de alta, mediana o baja entalpía. Estos, en algunas ocasiones se manifiestan en la superficie en forma de volcanes de lodo, fumarolas, géiseres, manantiales hidrotermales, aguas calientes, etc. Fig. 1.1.

Energía Geotérmica

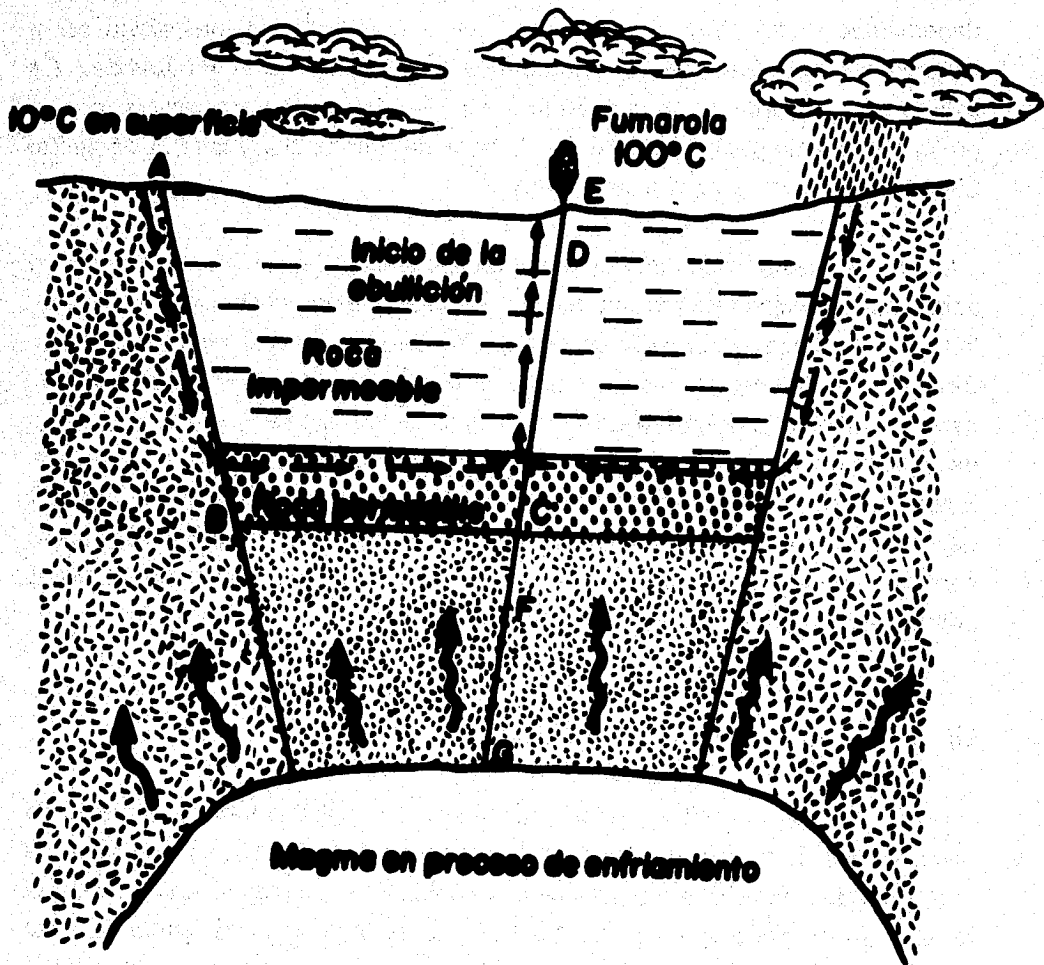


Fig.1.1.- Origen de la Energía Geotérmica.

Energía Geotérmica

El calor en el interior de la tierra proviene de dos fuentes primordiales: la energía calorífica atrapada desde el momento de la formación de la tierra, y la producida por el decaimiento de sustancias radioactivas contenidas en el interior del planeta. La interacción de estas dos fuentes básicas originan el denominado «*gradiente geotérmico*», cuya manifestación más obvia es el incremento paulatino de la temperatura con respecto a la profundidad. Es sabido que en general la temperatura en la tierra se incrementa con la profundidad, entre 200 y 1000 °C en la base de la corteza terrestre quizás entre 3500 y 4500 °C en el centro de la tierra.

Los gradientes térmicos mencionados se suelen calcular al menos en primera aproximación, bajo la suposición de que el calor se mueve hacia la superficie de la tierra mediante un proceso de conducción térmica a través de la roca sólida. Sin embargo, la energía térmica también es transmitida a la superficie de la tierra por medio del movimiento de roca fundida (magma) y por la circulación de agua a través de los poros interconectados y las fracturas en el subsuelo. Estos procesos se superponen a los gradientes regionales de tipo conductivo y dan lugar a muy altas temperaturas cerca de la superficie terrestre. Las áreas caracterizadas por estas altas temperaturas son o constituyen los objetivos primarios de la exploración y desarrollo geotérmico.

1.4.- TIPOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS.

Generalmente, los sistemas geotérmicos están constituidos por una fuente de calor, fluidos de trabajo (acuífero termal y acuífero de recarga) y una capa de roca sello que facilite la presurización del sistema e impida fugas excesivas de energía, tomando como parámetros discriminatorios: la naturaleza del ambiente geológico y el régimen de transferencia de calor, se pueden mencionar dos categorías de sistemas:

a) *Sistemas de vapor dominante.*

Este tipo de sistemas o yacimientos geotérmicos están formados de vapor originado de la ebullición del agua en la profundidad, el cual asciende, a través de fracturas, hasta zonas cercanas a la superficie donde se condensa y se drena como líquido a través de la roca matriz, siguiendo un patrón de flujo a contracorriente. En estos sistemas, el vapor es la fase que controla el perfil de la presión-profundidad (perfil vapor estático), se explotan en la actualidad con fines de generación de energía eléctrica, son sistemas de alta entalpía, generalmente de vapor seco, existen unos cuantos en el mundo. Ej. The Geysers (USA), Lardarello (ITALIA), etc.

b) *Sistemas de líquido dominante.*

Estos sistemas se caracterizan por producir aguas presurizadas con temperaturas: altas (150 a 350 °C), intermedias (90 a 150 °C) y bajas (menos de 90 °C). Los fluidos de estos, al iniciar su ascenso a la superficie, sufren un decremento en su presión, de tal forma que una fracción de éste se "flasha" y pasa como fase vapor, mientras que la fracción remanente permanece como líquido a presión. En estos sistemas el agua líquida es la fase que controla el perfil de presión-profundidad (perfil hidrostático); a este tipo de sistemas, dependiendo del contenido calorífico de sus fluidos, se les conoce como: sistemas de alta y baja entalpía. Generalmente son aprovechados por plantas de ciclo binario y en aplicaciones de calefacción, procesamiento de alimentos, etcétera.

LIQUIDO DOMINANTE (Alta Entalpía). Sistemas de salmueras super caliente, con temperaturas entre 200 y 330 °C. Son más abundantes que los sistemas de vapor dominante. Ej. Cerro Prieto (México), Wairakei (Nueva Zelanda), Tiwi (Filipinas), etc.

Energía Geotérmica

LIQUIDO DOMINANTE (Baja Entalpía). Sistemás con temperaturas de 100 a menos de 200 °C. son más abundantes que los anteriores en una proporción aproximada de 10 a uno. Ej. Heber (USA), Yangbajing (China), etc.

c) Roca seca caliente.

Sistemás rocosos con alto contenido calorífico pero con poca o ninguna agua. Ej. Los Alamos (USA).

d) Geopresurizados.

Sistemás que contienen agua y metano disuelto a alta presión y temperaturas moderadas. Ej. Reservorios en Texas y Louisiana (USA).

e) Marinos.

Sistema de alta entalpía existentes en el fondo marino. Ej. Descargas hidrotermales en el Golfo de Baja California (México).

f) Magmáticos.

Sistemás de roca fundida existentes en aparatos volcanicos activos o a gran profundidad en zonas de debilidad cortical. Ej. Volcanes Chichonal, Colima, (México), etc.

1.5.- USOS DE LA ENERGIA GEOTERMICA.

Aunque la energía geotérmica esta presente debajo de practicamente toda la superficie terrestre, su aprovechamiento es posible solamente cuando se cumplen ciertas condiciones, a saber:

- a) la energía debe ser accesible mediante la perforación de pozos, usualmente a profundidades menores de tres kilómetros, sin embargo, es posible ir a profundidades de seis a siete kilómetros en medios que presenten condiciones muy favorables;

Energía Geotérmica

b) dependiendo de la demostración de la tecnología adecuada y de su factibilidad económica, la producción de energía por fracturamiento de la roca de baja permeabilidad, requiere que la porosidad y permeabilidad del reservorio sean lo suficientemente altas como para permitir la producción de grandes cantidades de agua caliente;

c) debido a que el mayor costo de los desarrollos geotérmicos está en la perforación y que el costo por metro se incrementa con la profundidad, las concentraciones poco profundas de energía geotérmica serán las mejores;

d) dado que los fluidos geotérmicos pueden ser transportados económicamente, por ductos unas cuantas decenas de kilómetros sobre la superficie de la tierra, cualquier instalación generadora o de uso directo deberá estar localizada en o cerca de la anomalía geotérmica.

La utilización de los recursos geotérmicos en el mundo puede dividirse en dos grupos; el primero de ellos se denomina "uso eléctrico" y el segundo "usos no-eléctricos".

Usos Eléctricos.

El uso más visible de la energía geotérmica está en la generación de electricidad mediante el vapor de agua y su envío a un sistema turbina-generador. En el caso de los reservorios de vapor dominante, los cuales son raros, el vapor supercalentado es enviado directamente a la turbina sin necesidad de separar el agua lo cual no ocurre en el caso de los reservorios de agua dominante. La electricidad es más adecuadamente producida a partir de reservorios con temperaturas de 180 grados centígrados o más, sin embargo, reservorios con temperaturas de 150 °C o más bajas muestran posibilidades para la generación eléctrica, ya sea por uso directo del vapor o por

Energía Geotérmica

medio de la transferencia de su calor a un fluido de trabajo con un bajo punto de ebullición (isobutano o un freón). Se puede decir que la tecnología que se emplea en la generación de electricidad es la de turbinas ortodoxas de vapor a baja presión y, por consecuencia, las turbinas geotérmicas son grandes y caras, pero la compensación por la alta inversión de capital está en que la fuente de energía es relativamente barata. Durante los últimos años se ha incrementado el uso de centrales de ciclo binario que permite el uso de recursos geotérmicos de temperaturas más bajas mediante el empleo de una mezcla orgánica de punto de ebullición bajo como fluido de trabajo en la turbina. Una central de este tipo, se espera, reducirá la temperatura umbral aceptable para la generación de energía en el futuro. En la fig. 1.2 se muestra el diagrama simplificado de una planta geotermoeléctrica con capacidad de 220 MW, semejante a una planta termoeléctrica convencional, salvo en que: la caldera de vapor es reemplazada por el yacimiento geotérmico y los pozos que producen el vapor; el alto contenido de gases del vapor geotérmico amerita el empleo de condensadores de contacto directo; la utilización de vapor geotérmico después de condensado permite prescindir de una fuente de agua externa que reponga las pérdidas por evaporación en la torre de enfriamiento. Todo ello permite obtener factores de planta elevados, hasta alrededor del 90%.

Usos no-eléctricos.

Los reservorios geotérmicos de baja entalpía ($T < 180$ °C), son los que se destinan generalmente a usos no-eléctricos. De los 44 países que se sabe cuentan con estos recursos, 23 han efectuado exploraciones y únicamente 12 los están utilizando de manera significativa, estos se muestran en la tabla 1.1; aquí se engloban una gran variedad de actividades entre las cuales pueden mencionarse las siguientes: calefacción (Estados Unidos, Islandia, etc.), agricultura (Estados Unidos y Nueva Zelanda), procesamiento de alimentos (Estados Unidos y Filipinas), lavado y secado de lana (China y Nueva Zelanda), fermentación (Japón), industria papelera (Australia, China, Nueva Zelanda),

Energía Geotérmica

producción de ácido sulfúrico (Nueva Zelanda), manufactura de cemento (Islandia y China), etc.

Tabla 1.1
Países que utilizan Energía Geotérmica
para usos no-eléctricos

PAIS	ENERGIA TERMICA (MW)
JAPON	4475
HUNGRIA	1166
ISLANDIA	1127
EX U.R.S.S.	555
ITALIA	265
CHINA	151
ESTADOS UNIDOS	115
AUSTRIA	85
FRANCIA	56
CHECOSLOVAQUIA	43
RUMANIA	36
NUEVA ZELANDA	20
TOTAL	8014

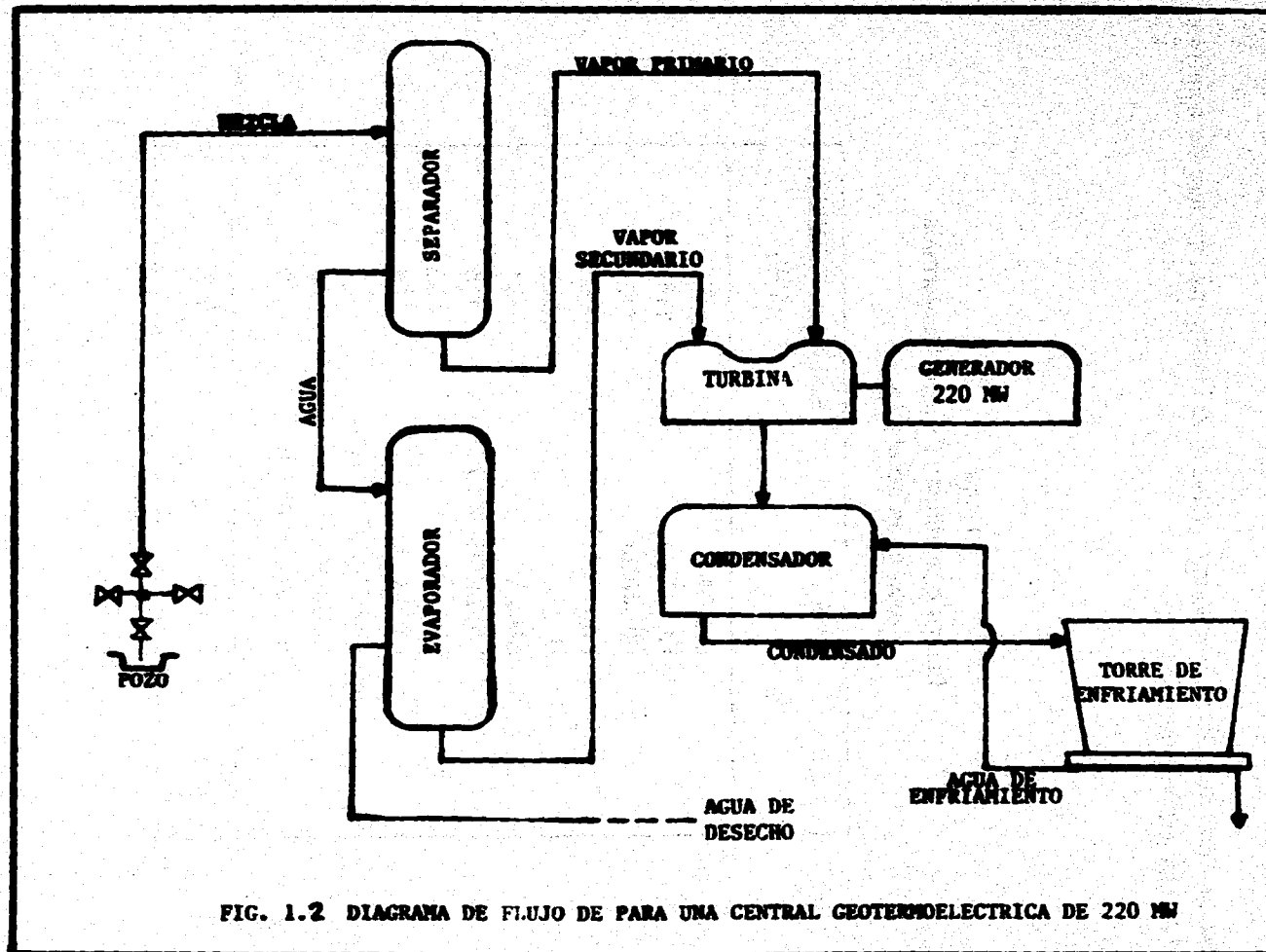


FIG. 1.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE PARA UNA CENTRAL GEOTERMIOELECTRICA DE 220 MW

Todas estas y muchas otras aplicaciones (fig. 1.3), habrán de tomar en cuenta la cantidad de recursos geotérmicos, su potencial y distribución en el país, sin embargo, la producción de energía a partir de estas fuentes conlleva o puede conllevar impactos ambientales adversos al medio y por ello deberán ser evaluados con toda seriedad. En Cerro Prieto se han empezado a dar algunos usos como:

- El empleo de aguas geotérmicas de desecho en acuicultura.
- El uso del vapor geotérmico en el sistema de aire acondicionado en el edificio principal de Cerro Prieto y, próximamente, en las centrales de CP-II y CP-III.
- La producción anual de 80 a 100 mil toneladas métricas de cloruro de potasio producto de importancia estratégica en la agricultura nacional, y que actualmente se importa en su totalidad.
- El empleo del calor geotérmico de desecho con fines industriales y de producción de alimentos.
- El uso de calor de baja temperatura para el establecimiento de granjas y agroindustrias.

1.6.- ETAPAS DE UN PROYECTO GEOTERMICO TIPO.

En general, un proyecto geotérmico tipo se compone de dos partes principales: la primera tiene un carácter prevalentemente de alto riesgo, asociado a la exploración de cualquier mineral o energético y su objetivo es la identificación del "yacimiento" (campo geotérmico), incluyendo un estudio de su posible utilización; la segunda, es de tipo mixto (de riesgo exploratorio, tecnológico y energético) y concierne al desarrollo y explotación del

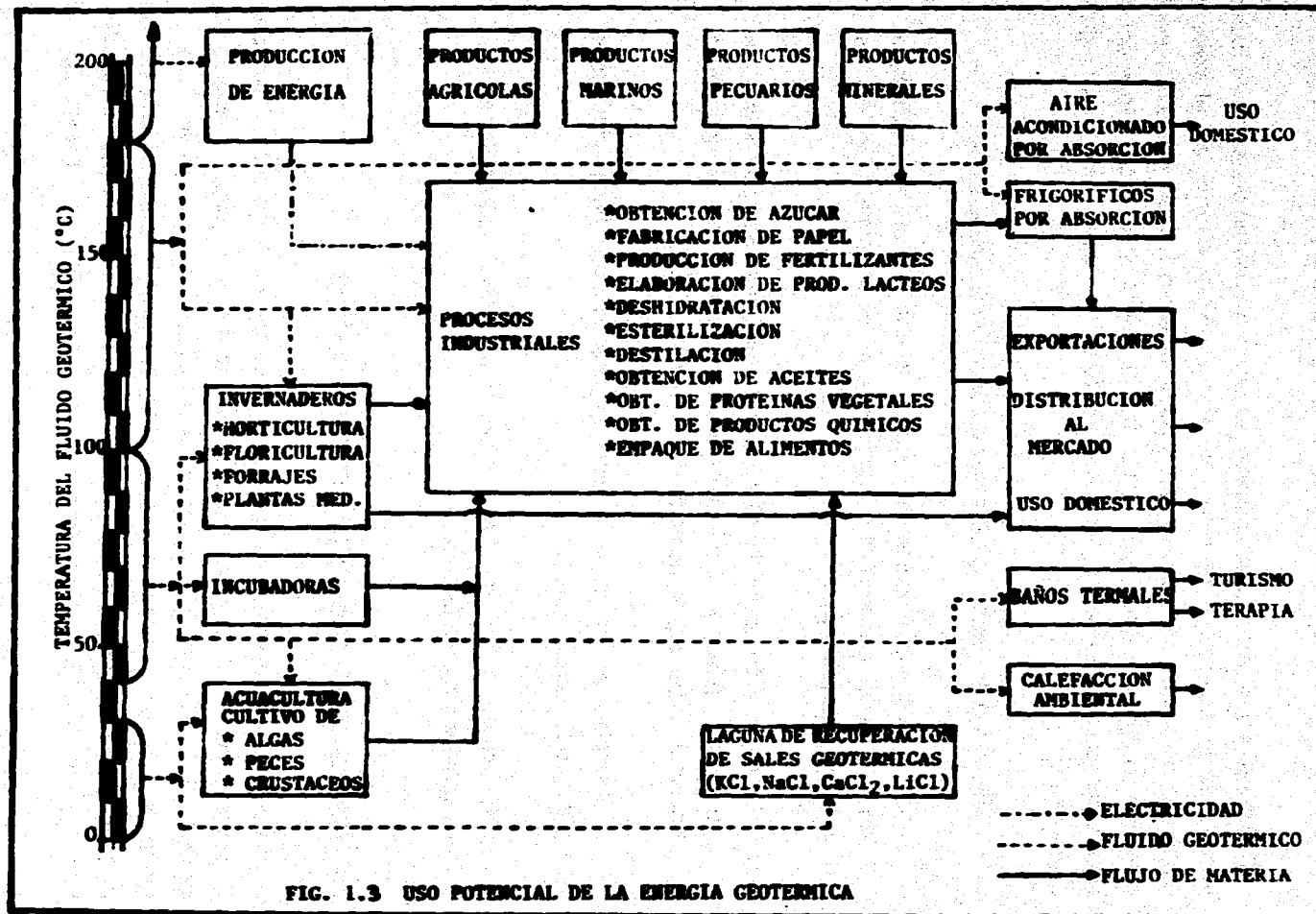


FIG. 1.3 USO POTENCIAL DE LA ENERGIA GEOTERMICA

Energía Geotérmica

yacimiento. La primera parte comporta notables niveles de riesgo económico y debe ser enfrentada con inversiones progresivamente crecientes; sin embargo constituye un conjunto de poco monto respecto a las estimaciones de inversión necesaria; la segunda parte, por el contrario, implica riesgos menores pero requiere de inversiones más elevadas.

Desde el punto de vista práctico, se ha convenido en articular el proyecto geotérmico tipo en cinco etapas distintas, de las cuales las tres primeras: 1) estudio de reconocimiento; 2) estudio de prefactibilidad; y 3) estudio de factibilidad, se refieren a la parte exploratoria del proyecto; las otras dos: 4) desarrollo y 5) explotación, se orientan a la producción sistemática del fluido endógeno, a su utilización industrial y a los problemas de administración del campo. La representación esquemática del desarrollo de un proyecto geotérmico tipo está indicada en el diagrama de flujo de la figura 1.4.

La etapa de reconocimiento consistirá en la valoración, con finalidades geotérmicas, de toda la información disponible acompañada de una serie de investigaciones preliminares a escala regional identificándose y delimitándose las áreas de mayor interés. Permitirá fijar las primeras hipótesis de trabajo, seleccionar una o más zonas preferenciales y planear de manera concreta las líneas de acción de las fases sucesivas (prefactibilidad y factibilidad).

En la etapa de prefactibilidad se desarrolla un modelo geotérmico preliminar de las áreas de interés más prometedoras, en las cuales el riesgo sea suficientemente reducido a modo que pueda aconsejarse pasar de la exploración de superficie a la explotación profunda y se determinen las localizaciones más convenientes para perforar pozos exploratorios.

Energía Geotérmica

**ESTUDIO DE
RECONOCIMIENTO
AREA: 10 mil-100 mil km**

**ESTUDIO DE
PREFACTIBILIDAD
AREA: 600-2000 KM**

**ESTUDIO DE
FACTIBILIDAD
AREA: 10-100 KM**

**E
X
P
L
O
R
A
C
I
O
N**

DESARROLLO

EXPLOTACIÓN

**E
X
P
L
O
T
A
C
I
O
N**

FIGURA 1.4.- ETAPAS DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO COMPLETO.

Energía Geotérmica

La fase de factibilidad se puede definir como el estudio que busca la localización física de un campo geotérmico, su consecuente evaluación de reservas extraíbles y de los recursos disponibles; el estudio del fluido y sus posibles esquemas de utilización energética y/u otras, así como la eventual instalación de una planta piloto o unidad industrial. Durante esta etapa se perforan pozos exploratorios profundos, se estima el potencial energético, se evalúan las posibles aplicaciones y en su caso se determinan las características principales de la central.

En la etapa de desarrollo se perforan los pozos necesarios para obtener la producción deseada, se instala el sistema de transporte de fluidos y se construyen las instalaciones necesarias para la utilización del recurso (invernaderos, centrales, etc.).

Finalmente en la etapa de explotación se considera la operación del campo y de las instalaciones superficiales, el mantenimiento de los mismos, el desecho de los fluidos y el control ambiental.

1.7.- LA GEOTERMA EN MEXICO.

A finales de la década de los 40's el Ing. Luis de Anda se enteró por medio de una serie de publicaciones italianas de los logros obtenidos en Larderello. Esto lo motivó para efectuar un viaje de estudios a este lugar, en donde se familiarizó con las técnicas de exploración y explotación que allí se utilizaban. Al igual que el Ing. de Anda, otros técnicos mexicanos en la misma época consideraron la posibilidad de utilizar la energía térmica de la tierra. Entre estos podemos mencionar al Ing. Vicente Cortés, quién en el año de 1951 deseaba estudiar la posibilidad de generar electricidad a partir de las manifestaciones superficiales de lútil de los Hervores, en el estado de Michoacán. En el mes de mayo de 1955 se formó la Comisión de Energía

Energía Geotérmica

Geotérmica (CEG), cuyo Director fue el mismo Ing. De Anda y en agosto o septiembre de ese año se inició la perforación del primer pozo geotérmico en nuestro país.

Como ya se ha mencionado, en México los primeros estudios encaminados al aprovechamiento de la energía geotérmica se inician a principios de la década de los 50's, obteniéndose información acerca de las manifestaciones termales conocidas. De ésta se seleccionó para iniciar la explotación de la energía geotérmica Pathé, una localidad de el estado de Hidalgo, la cual se encuentra aproximadamente a 130 km de la ciudad de México. Debido al éxito de las primeras perforaciones se decidió instalar una planta piloto de 3.5 MW. Esta unidad inicio su operación en el mes de noviembre de 1959. En Pathé se perforaron 17 pozos, sin embargo, nunca se obtuvo suficiente vapor para generar más de 600 kw. La planta se mantuvo generando hasta 1973 cuando se le retiró de servicio. A pesar de todo, la planta de Pathé representó un importante logro, ya que permitió que nuestro país fuera el tercer país en el mundo en utilizar la geotermia, puso de manifiesto la capacidad de los ingenieros mexicanos que hicieron el trabajo sin necesidad de contratistas extranjeros y sirvió para capacitar a los cuadros técnicos que habrían de conducir en el futuro el desarrollo de la geotermia en México.

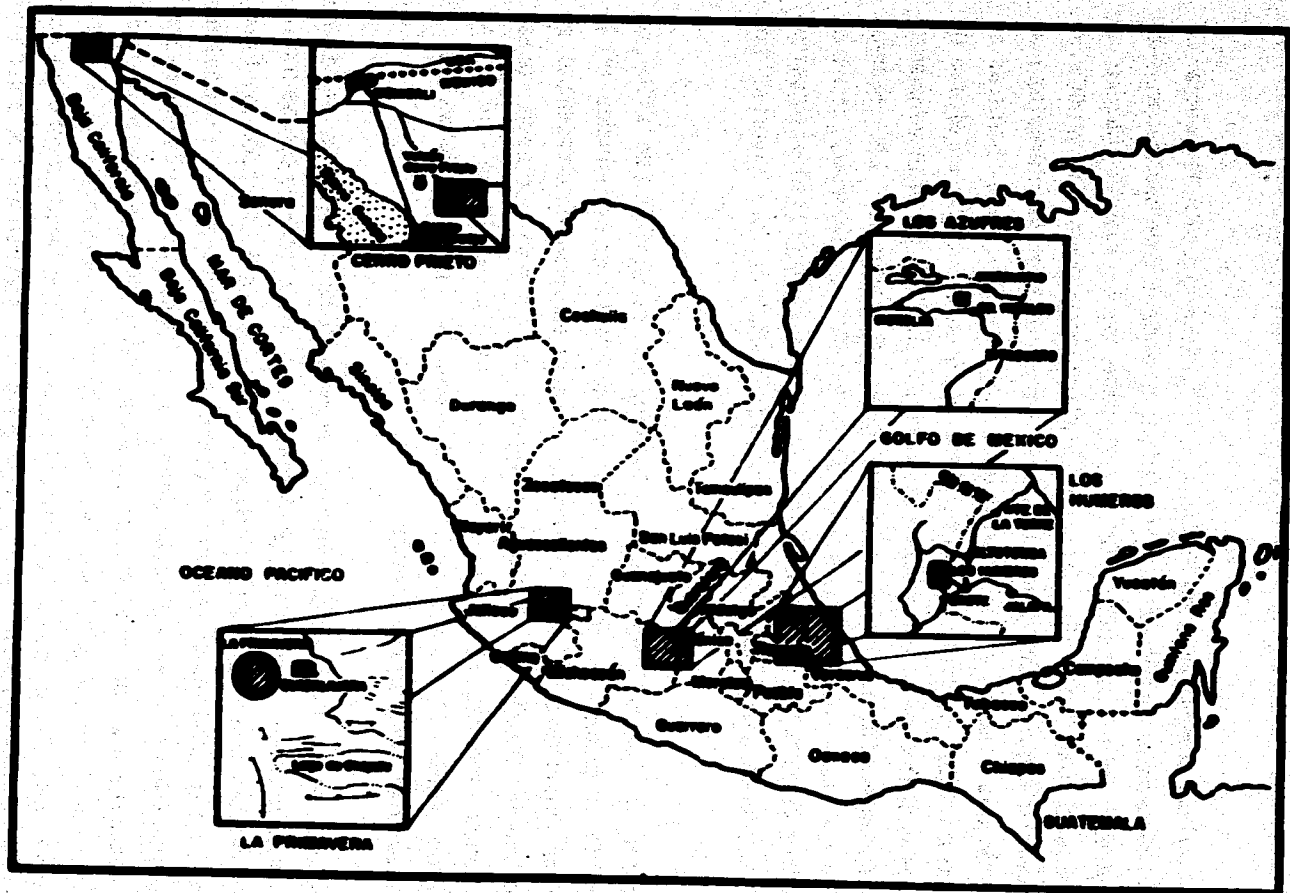
Después de Pathé, la CFE desarrolló el campo de Cerro Prieto el cual se encuentra localizado a 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali en Baja California Norte. En este campo se han perforado más de 200 pozos con profundidades entre 700 y 4300 m de profundidad. Actualmente, se tienen tres centrales con una capacidad instalada total de 620 MW. La central CP-I cuenta con cinco unidades; las primeras dos unidades de 37.5 MW entraron en operación en el año de 1973; en 1979 entraron a operación dos unidades adicionales de 37.5 cada una, finalmente en el año de 1981 entró en operación una unidad de baja presión de 30 MW. Las centrales CP-II y CP-III cuentan cada una con dos unidades de 110 MW; estas unidades entraron en operación entre 1985 y 1987. Cerro Prieto es el campo geotérmico de líquido dominante más grande del mundo y su explotación ha sido también una de las más exitosas.

Energía Geotérmica

Hasta la fecha, además de Cerro Prieto, la CFE ha llevado a cabo la explotación en otros tres campos (ver mapa 1): Los Azufres, en el estado de Michoacán, éste campo se encuentra localizado a 200 km al oeste de la ciudad de México, se han perforado más de 60 pozos con profundidades entre 600 y 3000 m. actualmente, se tienen instaladas 5 unidades a boca de pozo y una central más grande con una capacidad instalada total de 90 MW. Las primeras se instalaron en 1982, en tanto que la segunda entró en operación en el año de 1989. Los Humeros en el estado de Puebla con 15 MWe y La Primavera en el estado de Jalisco al momento sin instalaciones de producción, Las reservas probadas en estos cuatro campos son de 1400 MW. Las reservas probables ascienden a 4600 MW, considerando los volúmenes de energía termal extraíbles en los campos de Tres Virgenes, Caboruco, Araro, Ixtlan de los Hervores y Los Negritos.

Así mismo, la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la CFE, ha establecido la existencia de más de mil manifestaciones termales en la República Mexicana, habiendo llevado a cabo estudios de factibilidad en cuando menos 30 sitios. En algunos lugares ya se han perforado pozos exploratorios, entre los más recientes podemos mencionar El Caboruco en el estado de Nayarit, Tres Virgenes en el estado de Baja California Sur y Demumbadas en el estado de Puebla.

Los grande esfuerzos de la CFE han convertido a México en uno de los países más avanzados en el campo de la geotermia. Actualmente, México cuenta con un sector importantísimo de técnicos especializados en la localización de focos térmicos; en su evaluación mediante técnicas avanzadas y en los métodos de engranarlos a la producción de electricidad. Se estima así que cuenta el país con un grupo creciente de expertos en todas las bases de la geotermia, al grado que sus estudios contribuyen significativamente en la generación de energía como alternativa al uso de combustibles fósiles. Se han tenido muchos logros, existen resultados concretos. Entre estos, pueden destacarse los siguientes:



MAPA 1 .- PRINCIPALES CAMPOS GEOTERMICOS EN MEXICO.

Energía Geotérmica

a) La formación de un importante cuadro de especialistas, los cuales presentan sus resultados y trabajos en los más importantes foros internacionales recibiendo respeto y reconocimiento por su trabajo. Esto ha permitido que prácticamente no se tenga dependencia tecnológica en el aprovechamiento de la geotermia, inclusive se ha exportado y se exporta tecnología geotérmica al extranjero.

b) El desarrollo logrado en Cerro Prieto lo ha convertido en el campo geotérmico de líquido dominante más grande del mundo.

c) Las plantas geotermoeléctricas tienen factores de planta más elevados que los de otro tipo de plantas en el país.

d) La electricidad generada con fluidos geotérmicos tiene costos muy competitivos y es una energía muy limpia.

e) La generación de electricidad por medio de la energía geotérmica permite el ahorro de combustibles fósiles.

La experiencia mundial apunta a que las regiones con mayor posibilidad de éxito en el desarrollo geotérmico (y que disponen del recurso), son aquellas en donde existen demandas pequeñas de energía eléctrica, donde existen núcleos reducidos de población, dificultades de acceso para las redes de interconexión eléctrica nacional y relativo aislamiento con respecto a otros centros de consumo energético. Países como: Filipinas y El Salvador, basan buena parte de su producción de energía eléctrica en fuentes geotérmicas; por su parte, en países desarrollados como Estados Unidos, la geotermoelectricidad representa únicamente el 0.3 por ciento de su producción total.

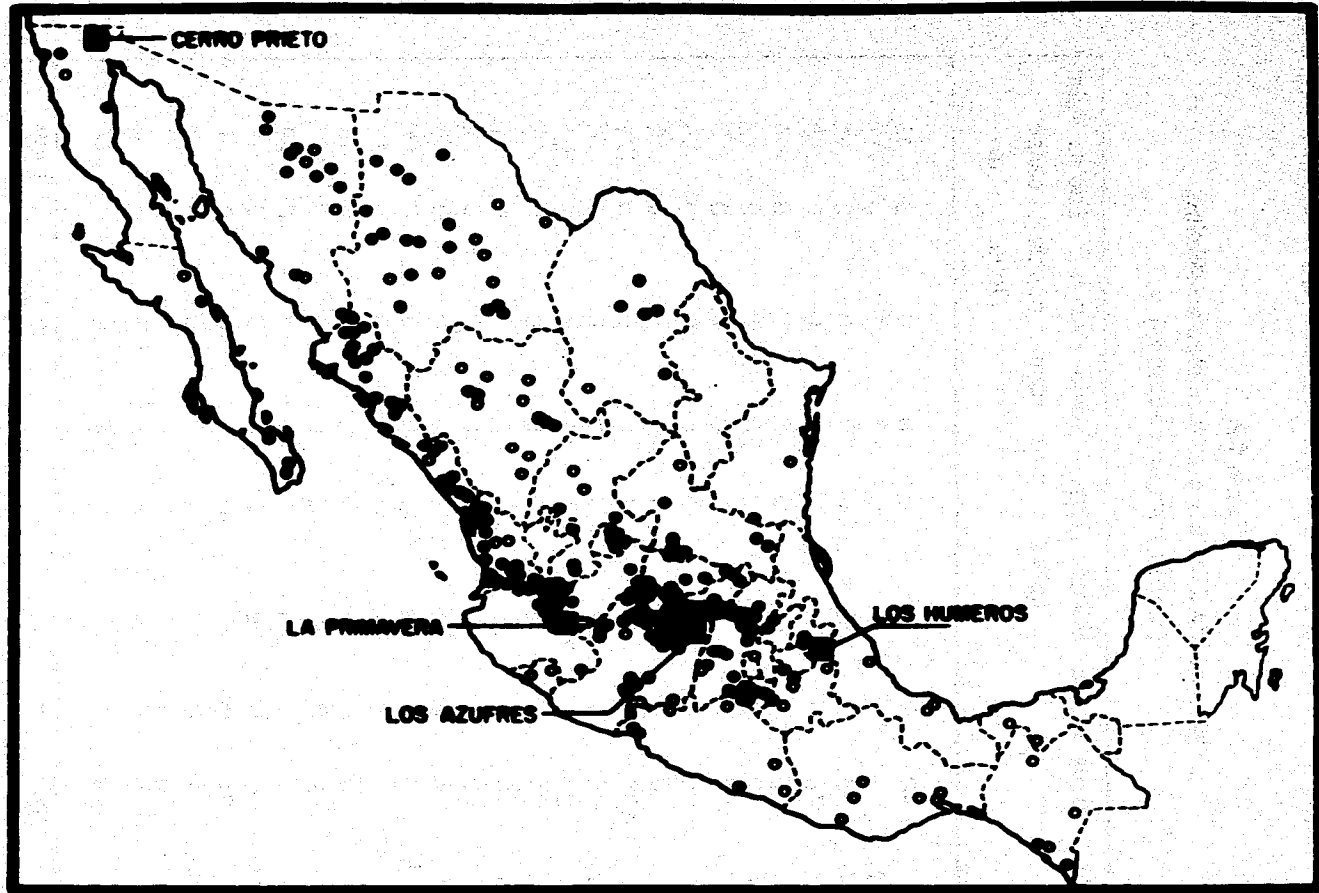
Varias de las condiciones expuestas en el párrafo anterior se cumplen para algunas regiones de México. La experiencia en el conocimiento del fenómeno geotérmico en los últimos cuarenta años, ubican al país entre el grupo

privilegiado de contar con dicho recurso. Hasta 1989, se conocían más de 1418 focos termales en 27 de sus 31 estados. Dichas manifestaciones incluyen: manantiales, pozos de agua caliente, fumarolas, volcanes de lodo y suelos calientes, (mapa 2).

Por otra parte, al ser los campos geotérmicos sistemas de energía renovable, pero de volúmenes relativamente pequeños (10 a 100 MW), no lo hacen buenos candidatos para la dotaciones de energía a los grandes centros de consumo. Existen algunas excepciones, por ejemplo, el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, tiene reservas probadas para producir aproximadamente 840 MW en un período de 20 años. El Campo de Los Azufres tiene reservas probadas de unos 300 MW, el de los Humeros 110 MW y La primavera 100 MW. Los demás campos con factibilidad de recursos de alta entalpía, tendrían, cada uno, del orden de 30 MW. Si bien el tamaño relativo de cada sistema geotérmico es pequeño, su amplia distribución geográfica los convierte en centros de desarrollo de sistemas autónomos de energía, sobre todo si ésta es aprovechada integralmente. La experiencia mundial, y especialmente la mexicana ha demostrado la factibilidad técnica y económica para el aprovechamiento del recurso geotérmico, señalándolo como la fuente alterna de energía de mayor posibilidad de éxito en la actualidad.

Con excepción de algunos sitios aislados, los estudios de termalismo en México se han enfocado hacia la generación de electricidad. Las aplicaciones de este recurso para fines turísticos y terapéuticos se limitan a desarrollos locales como balnearios municipales, ejidales y particulares. El reconocimiento de las localidades que presentan algún tipo de termalismo en México, se ilustra en la Tabla 1.2. De 1380 puntos estudiados, 808 corresponden a manantiales termales, 526 a pozos de agua caliente, 25 a fumarolas, seis a volcanes de lodo, 11 a zonas con hervideros, tres a suelos calientes y una noria de agua templada.

El número de zonas geotérmicas que conforman los focos termales descritos es de 545, ya que varias manifestaciones pueden tener fuentes comunes, la Comisión Federal de Electricidad ha realizado estudios de prefactibilidad en 41.



MAPA 2 .- PRINCIPALES FOCOS TERMALES EN MEXICO.

Energía Geotérmica

Tabla 1.2
Tipos de Manifestaciones termales en México.
(distribución por estados)

Estado	Pozos	Norias	Manan- tales	Hervi- deros	Fuma- rolas	Volca- nes de lodo	Suelos calien tes,	Total
Ags.	48	0	0	0	0	0	0	48
B.C.N.	1	0	14	0	2	2	0	19
B.C.S.	3	0	5	2	1	0	3	14
Chi.	10	0	39	0	1	0	0	50
Chis.	0	0	12	0	2	0	0	14
Coah.	2	0	10	0	0	0	0	12
Col.	0	0	3	0	0	0	0	3
Dur.	5	0	50	0	0	0	0	55
Gro.	0	0	10	0	0	0	0	10
Gto.	138	0	35	0	0	0	0	173
Hgo.	25	0	51	0	0	0	0	76
Jal.	83	1	263	7	13	4	0	361
Mex.	1	0	5	0	0	0	0	6
Mich.	10	0	58	0	1	2	0	71
Mor.	0	0	2	0	0	0	0	2
Nay.	0	0	51	2	3	0	0	56
Nvo. L.	3	0	3	0	0	0	0	6
Oax.	1	0	11	0	0	0	0	12
Pue.	0	0	8	0	2	0	0	10
Qro.	142	0	80	0	0	0	0	172
Sin.	0	0	28	0	0	0	0	28
S.L.P.	0	0	19	0	0	0	0	19
Son.	34	0	43	0	0	0	0	77
Tams.	1	0	2	0	0	0	0	3
Tlax.	0	0	1	0	0	0	0	1
Ver.	4	0	4	0	0	0	0	8
Zac.	15	0	29	0	0	0	0	44
Total	526	1	808	11	25	6	3	1380

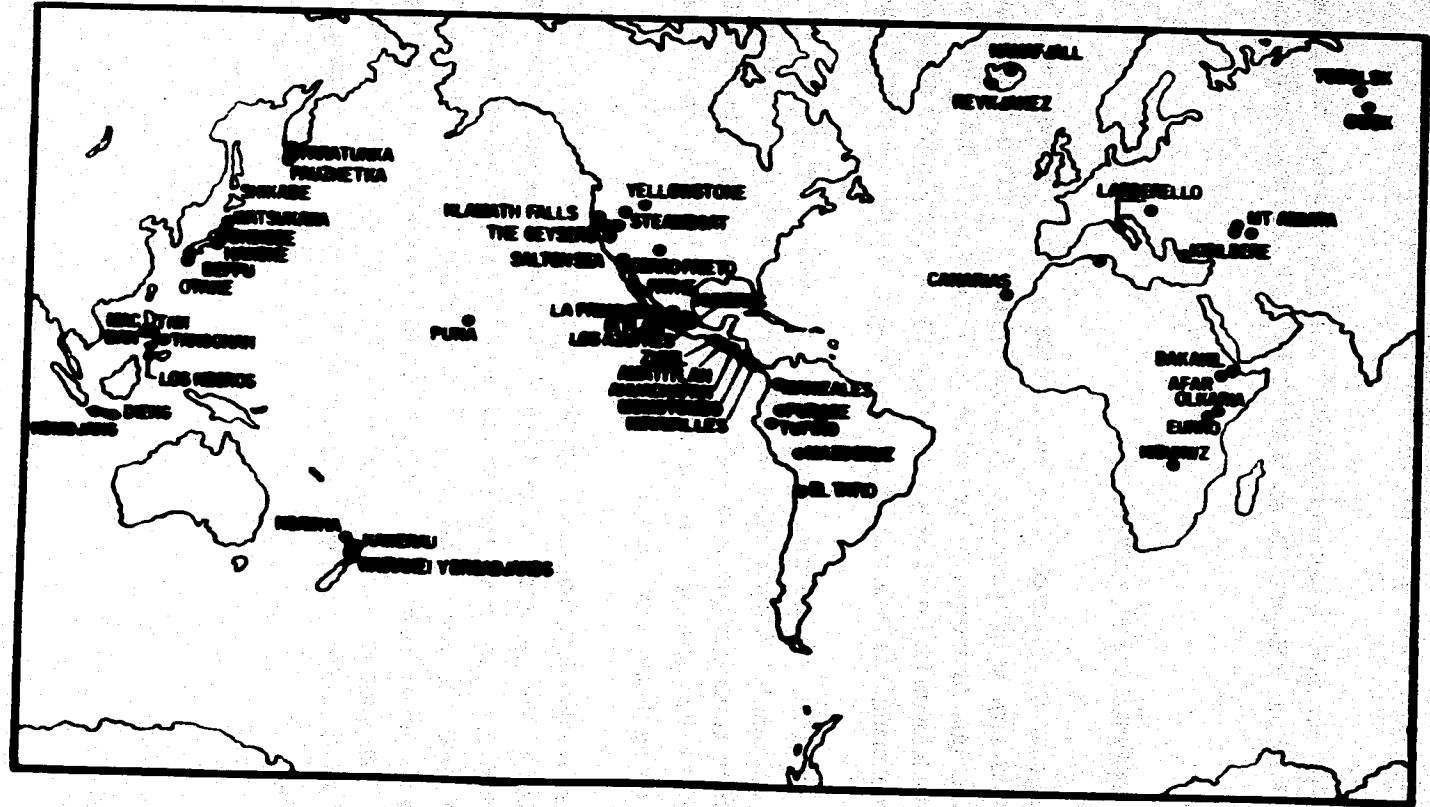
El resultado ha sido la identificación de 21 con posibilidades de extracción de fluidos de alta entalpía. En las otras 20 se han detectado fluidos de baja entalpía.

1.8.- GEOTERMA EN EL MUNDO.

El impacto de la geotérmica en la escena de los energéticos a nivel mundial no será significativo a corto plazo. Algunos expertos esperan con cierto optimismo que la energía de las fuentes geotérmicas pueda cubrir el uno por ciento del total de las necesidades mundiales de la energía en la década de los 90's, en el mapa 3 se muestran los principales campos geotérmicos en el mundo.

Por lo tanto, la energía geotérmica no puede ser considerada como alternativa del petróleo sino más bien como un complemento. En la tabla 1.3, se observa la capacidad geotermoelectrica instalada en el periodo de 1985 a 1990; la tabla 1.4 nos muestra la generación total de energía de los principales países que utilizan geotermoelectricidad.

A nivel mundial, la geotermoelectricidad ha sufrido un freno en su ritmo de crecimiento. En general, la geotermoelectricidad representa porcentajes muy pequeños de la generación comercial de la energía eléctrica en el mundo. Entre 1985 y 1990 sólo siete países de 19 que reportaron algún tipo de aprovechamiento geotermoelectrico, registraron algún incremento en su capacidad instalada, reflejando, con ello, una disminución del interés de los países por el desarrollo de este recurso, salvo algunas excepciones como Indonesia y Nueva Zelanda.



MAPA 3 .- PRINCIPALES CAMPOS GEOTERMICOS EN EL MUNDO.

Tabla 1.3
Capacidad geotermoelectrica instalada, 1985-1990

País	1985 MWe	1990 MWe	Incremento por ciento
1.- Estados Unidos	2022	2777	37.3
2.- Filipinas	894	894	0.0
3.- México	645	700	8.5
4.- Italia	519	545	5.0
5.- Nueva Zelanda	167	293	75.4
6.- Japón	215	215	0.0
7.- Indonesia	32	142	343.8
8.- El Salvador	95	95	0.0
9.- Kenia	45	45	0.0
10.- Islandia	39	45	15.4
11.- Nicaragua	35	35	0.0
12.- China	14	21	50.0
13.- Turquía	21	21	0.0
14.- Ex-Unión Soviética	11	11	0.0
15.- Francia	4	4	0.0
16.- Portugal	3	3	0.0
17.- Taiwán	3	3	0.0
18.- Grecia	2	2	0.0
19.- Tailandia	0	0.3	0.0
Totales	4766	5847.3	22.7

Fuente: Gutiérrez-Negrín, 1991.

Energía Geotérmica

Tabla 1.4

Generación de electricidad y generación geotermoeléctrica 1990 (GWh/año)

(Gutiérrez, L., 1991)

País	Generación total	Generación geotérmica	Porcentaje geotérmico
1.- China	0	50	0.0
2.- El Salvador	2178	373	17.1
3.- Estados Unidos	2467000	6000	0.3
4.- Ex-Unión Soviética	1772076	26	< 0.1
5.- Filipinas	28400	6730	23.7
6.- Francia	146620	20	< 0.1
7.- Grecia	31702	0	0.0
8.- Islandia	4475	260	5.8
9.- Italia	203220	3150	1.6
10.- Japón	643759	1359	0.2
11.- Kenia	2686	348	13.0
12.- México	105905	4661	4.4
13.- Nueva Zelanda	28950	2000	6.9
14.- Tailandia	35097	0	0.0
15.- Turquía	0	68	0.0

Nota: No hay datos de Indonesia, Nicaragua, Portugal ni Taiwán.

Las cantidades mencionadas se refieren al año 1989.

1.9.- CONCLUSIONES.

Como se ha visto, la energía geotermoeléctrica se puede considerar como un complemento de la energía obtenida de otras fuentes, además, en lo que se refiere a la protección del medio ambiente, ésta presenta, relativamente, pocos problemas de contaminación, la no producción de gases invernadero como CO₂ y CO. Con respecto a la contaminación atmosférica, la mayoría de las plantas geotérmicas de México utilizan condensadores de contacto directo en la generación de energía eléctrica por el método de descompresión abierta. Este tipo de sistema permite la entrada de gases a las torres de enfriamiento y su ulterior escape a la atmósfera. La contaminación de acuíferos de agua potable (someros) al comunicarlos (via perforación) con los acuíferos profundos y líquidos del reservorio que contienen altas concentraciones de elementos riesgosos (por ejemplo, metales pesados). Este problema puede ser resuelto con una adecuada terminación y ubicación de los pozos geotérmicos, y con el conocimiento detallado de los sistemas acuíferos presentes en la zona de influencia del reservorio. Con respecto al aprovechamiento del calor en plantas de potencia Ciclo Organico Rankine, los fluidos son reinyectados para mantener la presión del yacimiento. En ningún momento los fluidos están en contacto con el medio ambiente exterior.

Todos los elementos que se mencionaron en este y en los párrafos anteriores, nos hacen reflexionar sobre la necesidad de disponer de una energía alterna a las de las fuentes convencionales, de las cuales, la geotermia es la única que ha demostrado factibilidad técnica y económica para la producción de volúmenes relativamente altos de energía eléctrica por campo, ser renovable en la mayoría de los casos, menor contaminación ambiental, el aprovechamiento de subproductos de salmueras, la utilización directa del calor geotérmico para usos industriales, agroindustriales y domésticos, producción de frío por medio de transformadores térmicos con fluidos de trabajo a base de amoníaco y agua y además presenta costos competitivos con las fuentes convencionales de energía.

CAPITULO II

PRUEBAS DE PRESION

II.1.-INTRODUCCION

El objetivo de las pruebas de presión, que consisten básicamente en generar y medir variaciones de presión en los pozos, es obtener información del sistema roca-fluidos y de los mismos pozos, a partir del análisis de las citadas variaciones de presión. La información que se puede obtener incluye daño, permeabilidad, porosidad, presión media, discontinuidades, etc., la cual es esencial para la explotación eficiente de los yacimientos. En éste capítulo se presentan algunos conceptos básicos para comprender lo que es una prueba de presión, también se da una breve descripción de algunos de los tipos de pruebas de presión más comunmente tratadas en la literatura y como obtener de algunos parámetros mediante el uso de curvas tipo.

II.2.- CONCEPTOS BASICOS RELACIONADOS CON EL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION.

a) Factor de daño.

Durante la perforación, terminación o producción de un pozo, se puede afectar la permeabilidad alrededor de las paredes del agujero, para medir estos efectos Van Everdingen y Hurts introdujeron el concepto de factor de daño; ellos señalaron que existe una caída de presión causada por restricciones al flujo, la cual es ocasionada por una película muy delgada en la superficie de la cara de arena del pozo.

b) Períodos de flujo.

En el comportamiento de la presión en un pozo que produce a gastos constantes se pueden identificar tres períodos de flujo: transitorio, de transición y pseudoestacionario. Durante el tiempo en que el yacimiento actúa como un sistema infinito, el flujo está en estado transitorio y la presión es una función del tiempo y la distancia. Durante el período transitorio es válida la "solución de línea fuente".

Al final del período transitorio empiezan a sentirse los efectos de frontera, lo cual da origen al período de transición o transitorio tardío. El período de flujo pseudoestacionario ocurre cuando se han sentido todos los efectos de frontera y la presión declina linealmente con el tiempo, es decir $\partial p/\partial t = \text{cte}$.

Si se trata de un yacimiento con las fronteras externas a presión constante, cuando se han sentido todos los efectos de frontera, ocurre el período de flujo estacionario.

c) Efecto de almacenamiento.

El almacenamiento o llenado del pozo es un efecto que altera el comportamiento de la presión durante los tiempos cortos. Cuando se cierra un pozo en la superficie, el fluido de la formación continúa fluyendo hacia él durante algún tiempo. Cuando un pozo se abre en la superficie, el flujo inicial se debe a los fluidos almacenados en el agujero y posteriormente proviene de la formación.

El almacenamiento o llenado del pozo puede originarse por compresión o expansión de fluidos y por cambio de nivel del líquido en el pozo.

d) Representaciones adimensionales.

Las variables representadas en forma adimensional son de uso generalizado en el área de análisis de presiones, principalmente porque de esta manera es posible incluir en las soluciones cualquier valor de los parámetros involucrados. Por ejemplo, la solución fuente lineal en forma adimensional como se verá más adelante, incluye valores cualesquiera de ϕ , K , μ , q , etc. Las principales variables que aparecen son presión, radio y tiempo. Estas variables en forma adimensional utilizando unidades de Darcy para los parámetros y la variable real correspondiente, se representan como sigue.

$$P_D = [k h (p - p_i)] / (141.2 q \mu B) \dots\dots\dots(2.1)$$

$$t_D = (0.0002637 k t) / (\phi \mu c r_w^2) \dots\dots\dots(2.2)$$

$$r_D = r / r_w \dots\dots\dots(2.3)$$

11.3.- MEDICION DE PRESIONES SUBSUPERFICIALES.

En los estudios de ingeniería subsuperficial en donde se requiere conocer la presión existente en el pozo a profundidad, especialmente en el fondo o dentro de la formación productora, se cuenta con diferentes dispositivos indicadores y registradores de presión diseñados para bajarse a la profundidad del pozo a la que se desea determinar la presión. En algunos de estos instrumentos, el resultado de una prueba puede conocerse sólo después de retirar el dispositivo del pozo a la superficie y se examina el registro hecho por el instrumento. En otros casos, la presión se indica en un instrumento en la superficie. Algunos producen un registro continuo de la presión encontrada a través de todo el pozo hasta cualquier profundidad a que se bajen; otros producen registros de presión

Pruebas de presión

solamente al tiempo o a la profundidad a la que se desea. Los hay aquellos que sólo son capaces de indicar la presión máxima a la que han sido sometidos.

Probablemente el tipo más simple de instrumento indicador de presión a profundidad consiste de un tubo, cerrado en su extremo superior y equipado en su extremo inferior con una válvula de retención que se abre hacia arriba. Bajando el instrumento a la profundidad requerida, la muestra de fluido de pozo que ha entrado a través de la válvula de retención existe a la presión y temperatura que prevalece a esa profundidad. Entonces se retira el instrumento con la muestra aprisionada, la válvula de retención evita que se escape el fluido o se pierda la presión. Al llegar a la superficie, se coloca un manómetro en una conexión que tiene la válvula de retención, se abre la válvula y la presión que existe dentro del instrumento se indica directamente en el manómetro. Este instrumento es inexacto a menos que se hagan correcciones por temperatura adecuadas.

+ Instrumentos indicadores y registradores de presión a profundidad.

Las buenas mediciones de presión son parte esencial de la variación de presión en pozos. Para obtener mejores resultados, las presiones deberán ser medidas cerca de los estratos productores. Los tres tipos básicos de medidores de presión de fondo más utilizados son:

a) *Herramienta de cable de línea.*- El medidor de cable de línea es de los más usados en la industria petrolera; se introduce al fondo del pozo con un cable. El medidor consta de tres dispositivos: (1) uno sensible a la presión, generalmente un tubo Bourdon; (2) un registrador de presión contra tiempo y (3) un reloj, el cual está diseñado para funcionar durante intervalos específicos de tiempo.

El amerada RPG-3 es probablemente el más utilizado de los medidores con cable de línea. En la figura 2.1 se muestran esquemáticamente las partes más importantes de este dispositivo. El reloj está colocado en la parte superior del

Pruebas de presión

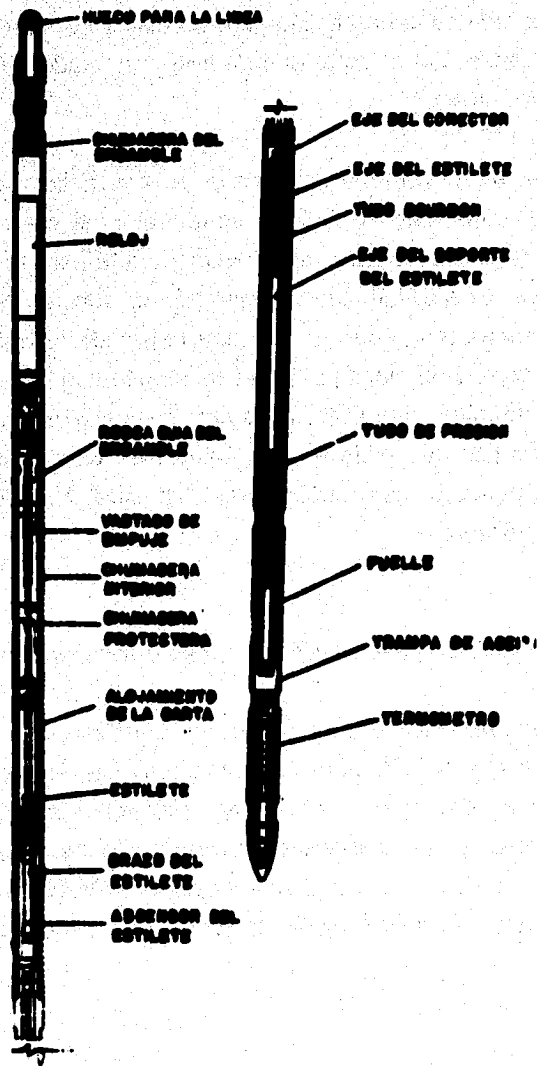


FIG. 2.1 - MEDIDOR DE PRESION AMERADA RPG-3.

Pruebas de presión

instrumento, conectado a una sección registradora, la cual contiene una gráfica metálica cubierta con una capa negra. El reloj está diseñado para mover la gráfica verticalmente a la sección del estilote, el cual está conectado a una flecha unida por un resorte al tubo Bourdón.

El medidor de presión es un tubo Bourdón enrollado helicoidalmente, de libre rotación en su parte superior; los fluidos entran al final de la parte baja del medidor y transmiten la presión al Bourdón, causando que éste se desenrosque y gire en su parte libre. El movimiento es registrado en función del tiempo por el estilote, marcando líneas muy finas en la capa negra de la placa metálica. Se tiene una escala de tiempo de cinco pulgadas de longitud; la escala de presión es de dos pulgadas. Muchos medidores tienen dispositivos para registrar la temperatura de fondo por medio de un termómetro de temperatura máxima; las mediciones de temperatura son importantes, ya que muchas calibraciones dependen de la temperatura.

b) Herramientas de registro con instalaciones superficiales permanentes.

Los registros medidores con instalaciones permanentes son agregados generalmente a la sarta de la T.P., estos instrumentos incluyen medios para medir presiones en el fondo del pozo y vías para transmitir las mediciones a la superficie, registrándose éstas en función del tiempo. Pueden proporcionar datos de presión en forma continua o en forma ocasional. Muchos medidores son usados con cables para transmitir la señal desde el sensor hasta el registrador en la superficie.

c) Herramientas de registros recuperables en la superficie.

En la mayor parte de estas herramientas se utilizan tubos Bourdón. La Hewlett-Packard Co. fabrica un medidor de alta presión en el que se utiliza un cristal de cuarzo sensible a la presión; el cristal de cuarzo cambia la frecuencia de las

Pruebas de presión

vibraciones con los cambios de presión. La frecuencia de las vibraciones son comparadas con la frecuencia de un cristal de referencia y la señal de frecuencia es transmitida a un equipo monitor en la superficie. La frecuencia es convertida a presión, usando ecuaciones proporcionadas por la compañía; la exactitud del medido Hewlett-Packard es de ± 0.5 psi.

II.4.- PRUEBAS DE PRESION.

Al llevar a cabo una prueba de presión se deben registrar las variaciones del gasto y la presión en el fondo de uno o varios pozos, por un determinado tiempo. Dependiendo del número de pozos que intervienen en las pruebas, éstas pueden clasificarse en dos tipos principales: pruebas de un pozo y pruebas multipozo (Earlougher, 1977; Matthews y Russell, 1967; Ramey H. J. Jr, 1976). En las primeras un mismo pozo desempeña los papeles de pozo activo y de pozo de observación. En las segundas, están involucrados al menos dos pozos: uno activo y uno de observación. Los pozos activos juegan el rol de "excitadores" del sistema. La inyección o extracción de fluido de los pozos activos provoca la propagación de una perturbación de presión en el yacimiento. El desarrollo temporal de dicha perturbación se registra en uno o varios pozos llamados de observación. Con los datos obtenidos de los registros llevados a cabo, pueden determinarse varios parámetros de acuerdo al tipo de prueba realizado. Los tipos de pruebas de presión más comunes son las siguientes:

II.4.1.- PRUEBAS DE PRESION DE UN SOLO POZO.

A) PRUEBAS DE INCREMENTO DE PRESION.

Durante una prueba de incremento de presión el pozo fluye a gasto constante por un tiempo determinado, posteriormente el pozo se cierra, registrandose el incremento de presión correspondiente. En la figura 2.2, se muestra graficamente el comportamiento de una prueba de incremento de presión. Entre las desven-

tajas que una prueba de este tipo presenta, pueden considerarse el tener que cerrar el pozo y la dificultad para mantener el gasto constante antes del cierre (si la variación del gasto es significativa, mayor del 20%, se usan métodos de análisis de gasto variable). Algunos de los métodos más comunes para efectuar el análisis de este tipo de pruebas son: El Método de Horner, Método de Miller-Dyes-Hutchinson (MDH) y el Método de correlaciones.

a) Método de Horner.

La gráfica de P_{ws} vs $(t_p + \Delta t) / \Delta t$ en papel semilogarítmico es comúnmente llamada gráfica de Horner en la industria petrolera, al método involucrado se le conoce como método de Horner, la figura 2.3 es una de estas gráficas donde se muestra la sección de la línea recta, esta puede ser extrapolada a $(t_p + \Delta t) / \Delta t = 1$, ($\log [(t_p + \Delta t) / \Delta t] = 0$), es equivalente a un tiempo de cierre infinito, para obtener una estimación de P_i (para períodos cortos de producción, al principio de la explotación del yacimiento). La P_{1hr} (P_{ws} a $\Delta t = 1$ hr) debe ser tomada de la línea recta de la gráfica de Horner. Cuando los datos de incremento no caen sobre la línea recta a 1 hr, ésta deberá de ser extrapolada para 1 hora. El factor de daño se puede calcular con la ecuación 2.6.

b) Método de MDH.

Este método de análisis de datos de incremento de presión se basa en la solución de ecuaciones para un yacimiento finito. Cuando el tiempo de cierre del pozo es pequeño comparado con el tiempo de producción antes del cierre, es decir, $\Delta t < t_p$. La gráfica en papel semilogarítmico de P_{ws} vs Δt deberá ser una recta, esta gráfica es comúnmente llamada gráfica de MDH.

Pruebas de presión.

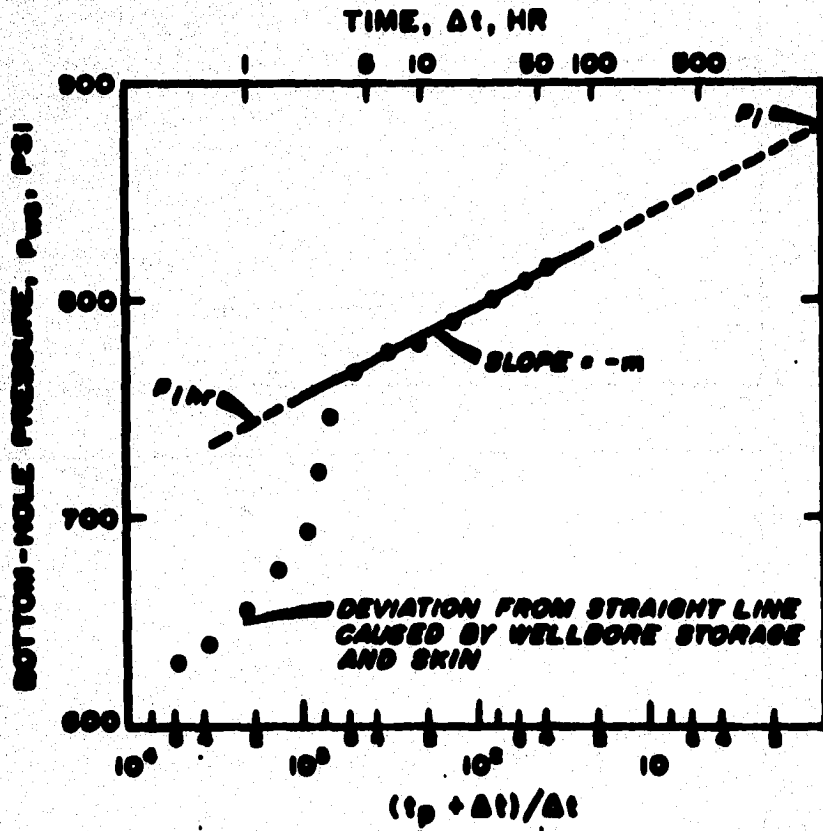


FIG. 2.3 GRAFICA DE HORNER PARA DATOS DE UNA PRUEBA DE INCREMENTO DE PRESION, QUE MUESTRA EFECTOS DE ALMACENAMIENTO Y DAÑO (EARLOUGHER).

c) Método de correlaciones.

Esta técnica es útil para analizar aquellas pruebas de presión donde los datos están afectados por almacenamiento y la duración de la prueba no fue suficiente para alcanzar la línea recta semilog. Se basa en una correlación entre las pendientes de las dos líneas rectas en función del coeficiente de almacenamiento.

B) PRUEBAS DE DECREMENTO.

Una prueba de decremento de presión consiste en una serie de mediciones de presión de fondo durante un período de flujo. Comúnmente el pozo se cierra para estabilizar la presión en el yacimiento, se baja el equipo de medición y se inicia el flujo del pozo. La etapa ideal para efectuarlos en pozos petroleros es al principio de la explotación; se puede obtener información sobre la permeabilidad, el factor de daño, volumen drenado, etc. entre las principales ventajas se pueden mencionar, que es económica (no hay cierre), ya que la técnica que se utiliza es la de volumen drenado. La desventaja es la dificultad de mantener $q=cte$. La figura 2.4 muestra gráficamente el comportamiento de una prueba de decremento de presión.

a) Pruebas a gasto constante.

La presión en un pozo que fluye a un gasto constante en un yacimiento infinito es:

$$P_{wf} = P_{1hr} + m \log t \dots\dots\dots(2.4)$$

Si se traza la gráfica de P_{wf} contra $\log t$ la figura que se obtiene es la una línea recta cuya pendiente es:

$$m = - (162.6 q B \mu) / (k h) \dots\dots\dots(2.5)$$

Pruebas de presión

y P_{1hr} es la ordenada al origen. Con la ecuación anterior se puede determinar la permeabilidad de la formación y conociendo P_{1hr} también se puede calcular el factor de daño con la siguiente expresión:

$$S = 1.1513 [(P_i - P_{1hr}) / (-m) \cdot \log (k / \phi \mu c_i r_w^2) + 3.2275] \dots (2.6)$$

b) Pruebas de límite de yacimiento.

Se llaman pruebas de límite de yacimiento aquellas que se corren con el propósito de estimar el volumen del yacimiento que drena hacia el pozo probado. La estimación del volumen poroso es posible cuando se alcanza el período de flujo pseudoestacionario, durante el cual el comportamiento de la presión está relacionado con el volumen poroso.

c) Pruebas a gasto variable.

Una prueba a gasto variable puede ser de un sólo gasto ligeramente variable o de varios gastos constantes. De un pozo con "n" cambios de gasto durante su historia de producción, utilizando la aproximación logarítmica de la solución de línea fuente se pueden tener los siguientes casos: 1) pruebas de decremento de presión, 2) pruebas a dos gastos y 3) pruebas a "n" gastos.

C) PRUEBAS EN POZOS INYECTORES.

La literatura publicada específicamente sobre el análisis de pruebas de presión en pozos inyectoros es mucho menos abundante que la correspondiente a pozos de producción. Sin embargo bajo ciertas circunstancias, que generalmente se tienen en procesos de inyección de agua, el análisis es similar a las pruebas de incremento y de decremento de presión.

Pruebas de presión

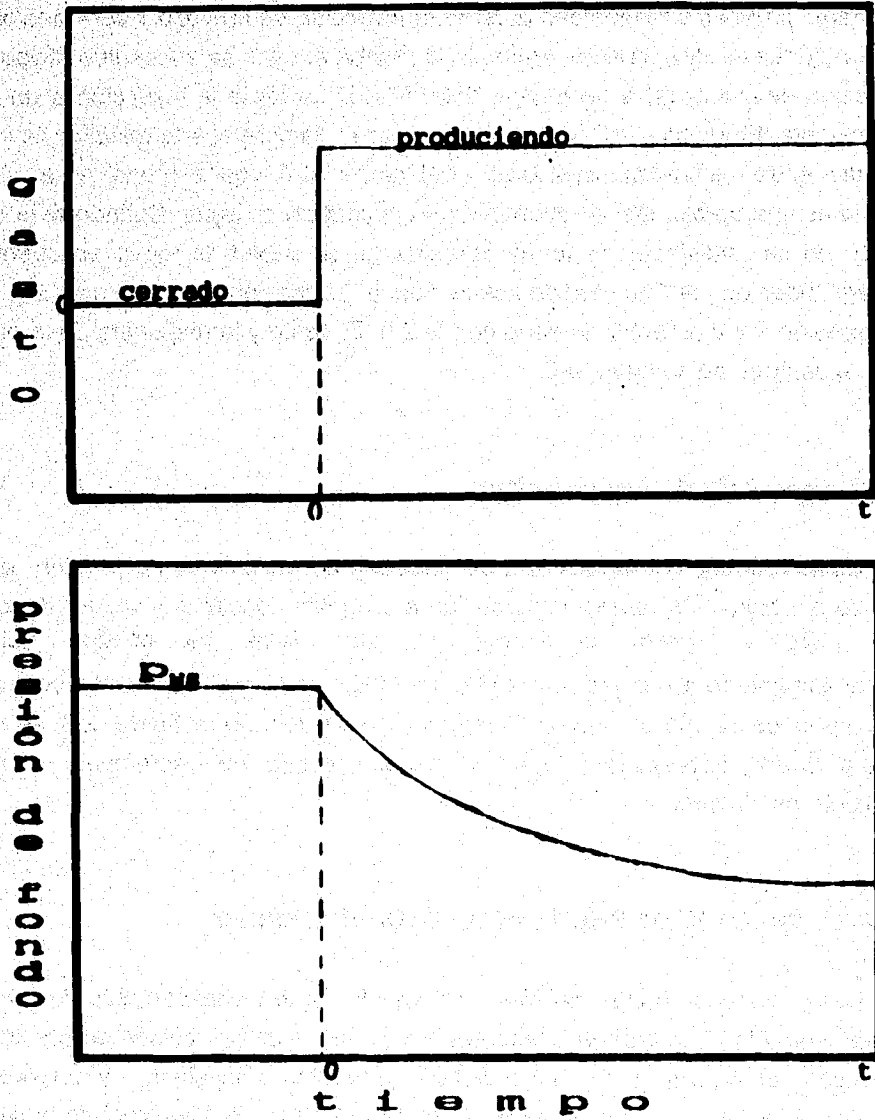


FIG. 2.4 GASTO Y RESPUESTA DE LA PRESION PARA UNA PRUEBA DE DECREMENTO.

a) Prueba de inyectividad.

Estas pruebas son medidas durante la inyección en un pozo y son análogas a las pruebas de decremento. Antes de la prueba el pozo se encuentra cerrado y la presión estabilizada; a un tiempo determinado se inicia la inyección a un gasto constante. El análisis es relativamente simple, siempre que la relación de movi- lidades entre los fluidos (inyectores y del yacimiento) sea cercano a la unidad. Esta es una aproximación razonable para inyección de agua. Cuando esta condi- ción no se satisface de forma aproximada, se deben de tomar en cuenta las magnitudes de los "bancos" de aceite y agua. La presión se puede calcular con la expresión 2.4 y el factor de daño con la 2.6. El gasto y la respuesta de la presión se muestran en la figura 2.5.

b) Pruebas falloff, (recuperación).

Estas pruebas son análogas a las pruebas de incremento de presión en un pozo productor. Se realiza la inyección a un gasto constante, $q=cte$, hasta que el pozo se cierra al tiempo t_p . Los datos de presión tomados inmediatamente antes y durante el período de cierre son analizados de manera similar a los de una prueba de incremento de presión. En la figura 2.6 se mues- tra el gasto y la respuesta de presión en una prueba de decremento en pozos inyectores (falloff).

II.4.2.- PRUEBAS DE PRESION EN POZOS MULTIPLES.

Las pruebas en pozos multiples son aquellas que involucran más de un pozo, tales como las pruebas de interferencia y las pruebas de pulsos de presión. Se requiere al menos de un pozo activo (productor o inyector) y un pozo de observación (cerrado) como se observa en la figura 2.8. Las pruebas multipozo,

Pruebas de presión

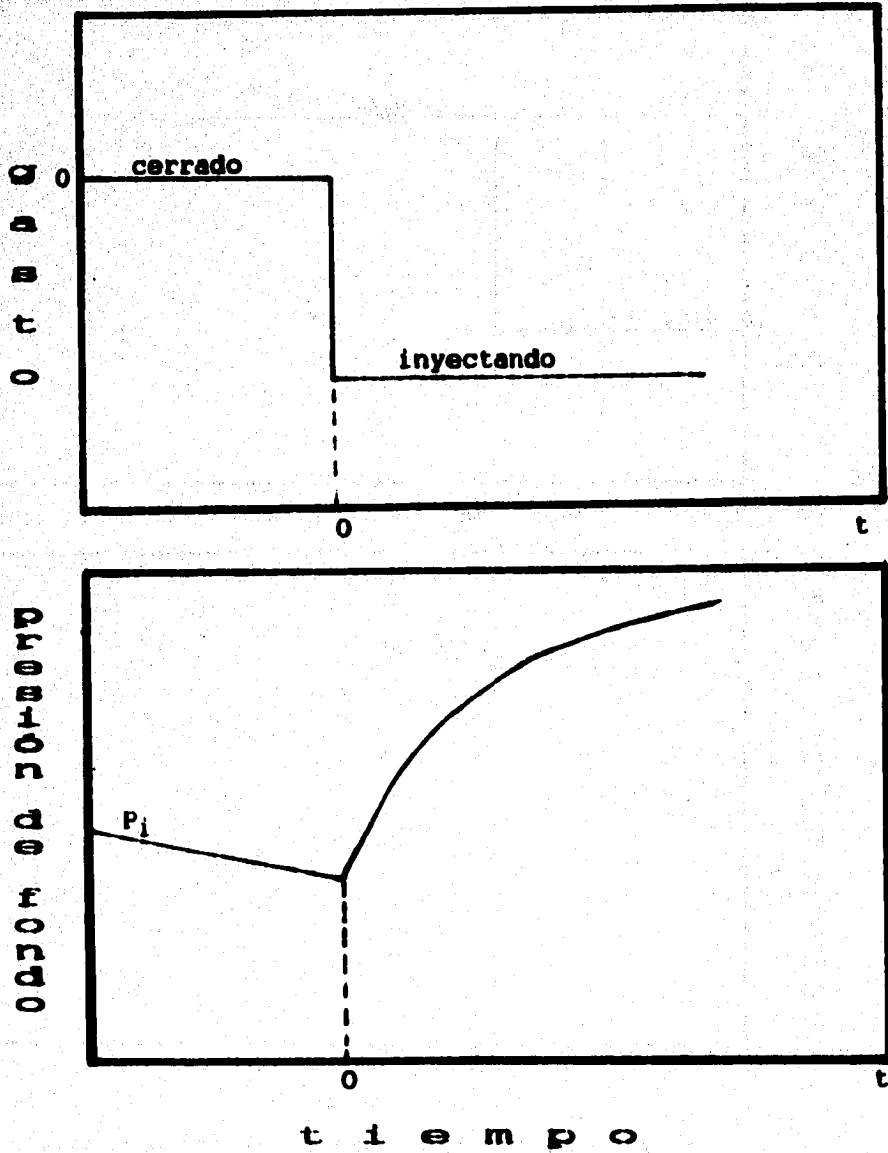


FIG. 2.5 GASTO Y RESPUESTA DE LA PRESION PARA UNA PRUEBA DE INYECTIVIDAD.

Pruebas de presión

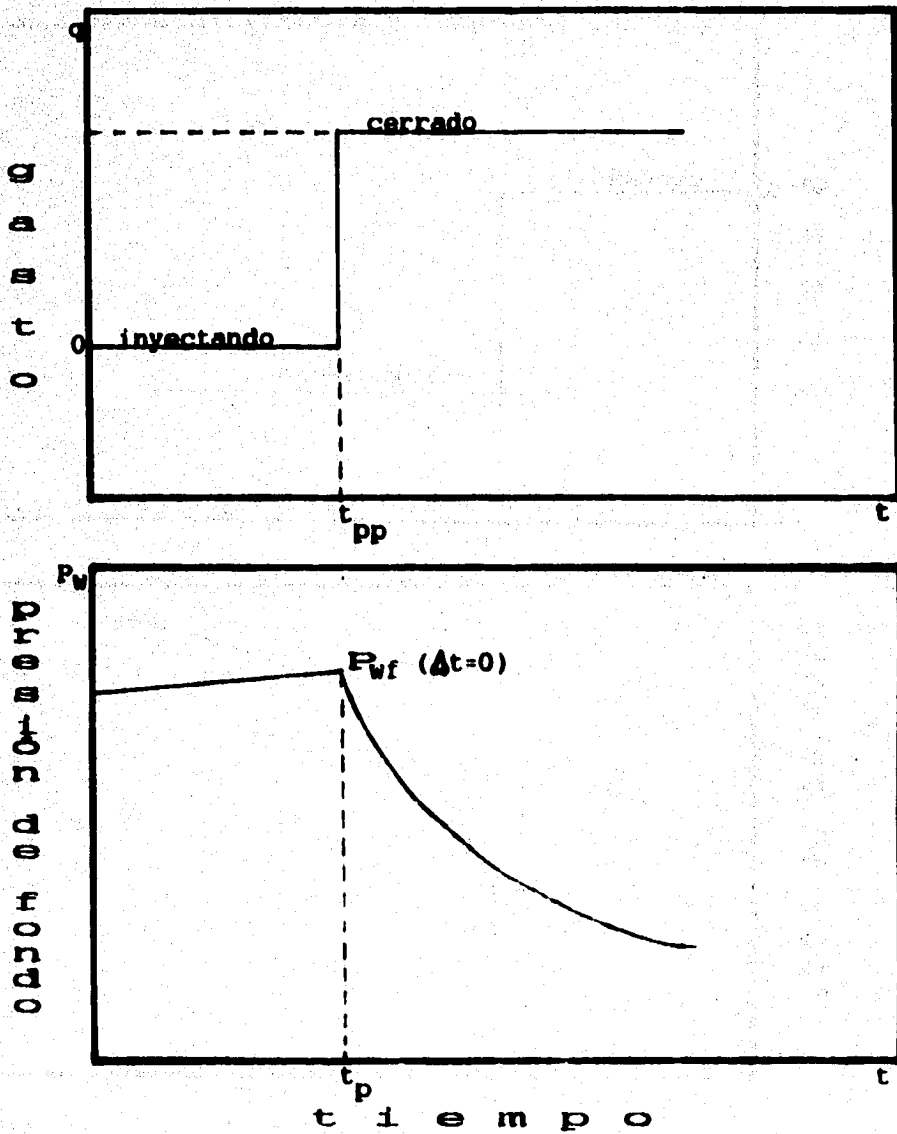


FIG. 2.6-GASTO Y RESPUESTA DE LA PRESION PARA UNA PRUEBA DE DECREMENTO EN UN POZO INYECTOR ("falloff").

conocidas también con el nombre de *pruebas de interferencia*, tiene como objetivo el obtener los valores de varios parámetros que describen las propiedades más importantes del yacimiento, tales como transmisividad (kh/μ), capacidad de almacenamiento (ϕch), y la existencia y localización de fronteras hidrológicas. Cuando el ingeniero de yacimientos cuenta con suficiente información de este tipo, puede determinar el grado de conectividad o continuidad en el yacimiento y las direcciones preferenciales del movimiento de los fluidos.

En una prueba de interferencia, una larga modificación del gasto en un pozo crea una interferencia de presión en un pozo de observación mediante la cual pueden analizarse algunas propiedades del yacimiento.

Una prueba de pulsos proporciona datos equivalentes, pero la técnica de análisis es más complicada. Aunque existen numerosas variaciones posibles aquí se presentan las técnicas básicas para analizar interferencias simples para una prueba más compleja se pueden emplear técnicas computarizadas ideando una técnica apropiada de análisis mediante la cual se puedan calcular fácilmente varios parámetros del yacimiento y utilizando pozos múltiples.

Las pruebas de pozos múltiples tuvieron avances en investigaciones realizadas en yacimientos más que en una simple prueba de pozo. Aunque comúnmente se cree que las pruebas de interferencia proporcionan información acerca sólo de la región entre los pozos; los resultados de las pruebas son actualmente influenciadas por una gran extensión. Vela y McKinley muestran que la región de influencia para la prueba de pulsos es aproximadamente como muestra la figura 2.7, el radio de influencia está dado por:

$$r_{inf} = 0.029 [k t / \phi \mu c]^{0.5}$$

Podemos esperar una influencia similar en la región en una prueba de interferencia normal. La mayor diferencia es que la prueba al tiempo, "t", es mucho más grande en una prueba de interferencia que en una de pulsos. Así r_{inf} y la región total de influencia son substancialmente mayores en una prueba

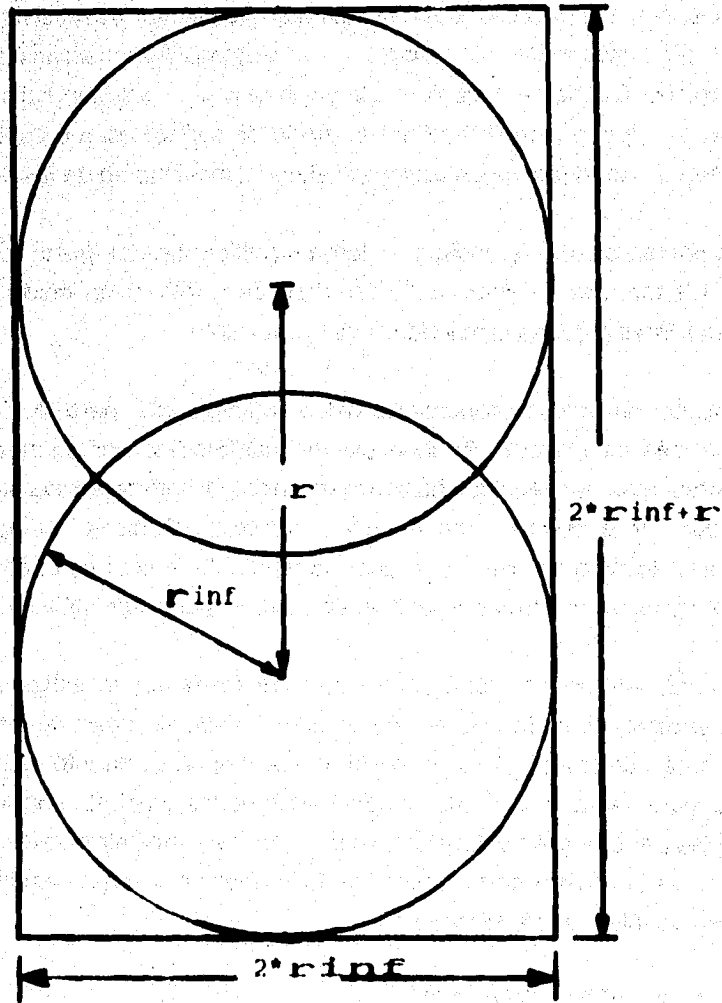


Figura 2.7 .- Radio aproximado de influencia en la región de interferencia en una prueba de pulsos. Según Vella y Mckinley.

Pruebas de presión

de interferencia que en una de pulsos. En general, no podemos estimar cuantitativamente la variación real en permeabilidad y el producto $\phi \cdot c_t$ sin utilizar algún tipo de simulador de yacimientos.

El factor de daño no influye en una prueba de presión en pozos múltiples ya que el daño afecta sólo al pozo activo ya que se concentra directamente alrededor de este. No obstante un gran daño o una frontera pueden afectar la respuesta en el pozo de observación. El efecto de almacenamiento es disminuido por interferencia pero no es eliminado por completo. Se requieren más investigaciones para comprender los efectos de almacenamiento de pozos múltiples.

Usualmente la transmisividad (Kh/μ) y el producto (ϕc_t) se calculan de una prueba de presión en pozos múltiples. En yacimientos con contacto fluido-fluido (zona gas-aceite por ejemplo), en la region de influencia las pruebas de interferencia y de pulsos proporcionan resultados de producción sin sentido debido a las diferentes propiedades en las regiones con fluidos diferentes.

a) Pruebas de interferencia.

La figura 2.8 presenta esquemáticamente los pozos que se utilizan en una prueba de interferencia o de pulsos en un yacimiento. El pozo de observación está cerrado para la medición de presiones (teóricamente no se inhabilita un pozo de observación; pero prácticamente se considera como una regla que este cerrado). En la figura 2.9 se observa el comportamiento de la historia del gasto en el pozo activo y la respuesta de la presión en ambos pozos, activo y de observación. En una prueba de pozos múltiples el gasto de flujo en un pozo activo varia mientras la presión de fondo se mide en el pozo de observación.

Para el análisis de Pruebas de Interferencia se aplican las curvas tipo, de alguna manera tambien son aplicables a pruebas de decremento de presión.

Pruebas de presión

Afortunadamente, las curvas tipo son más simples para pruebas de interferencia que para pruebas de un sólo pozo porque usualmente hay sólo una curva tipo (Fig 2.11) considerada para un sistema infinito.

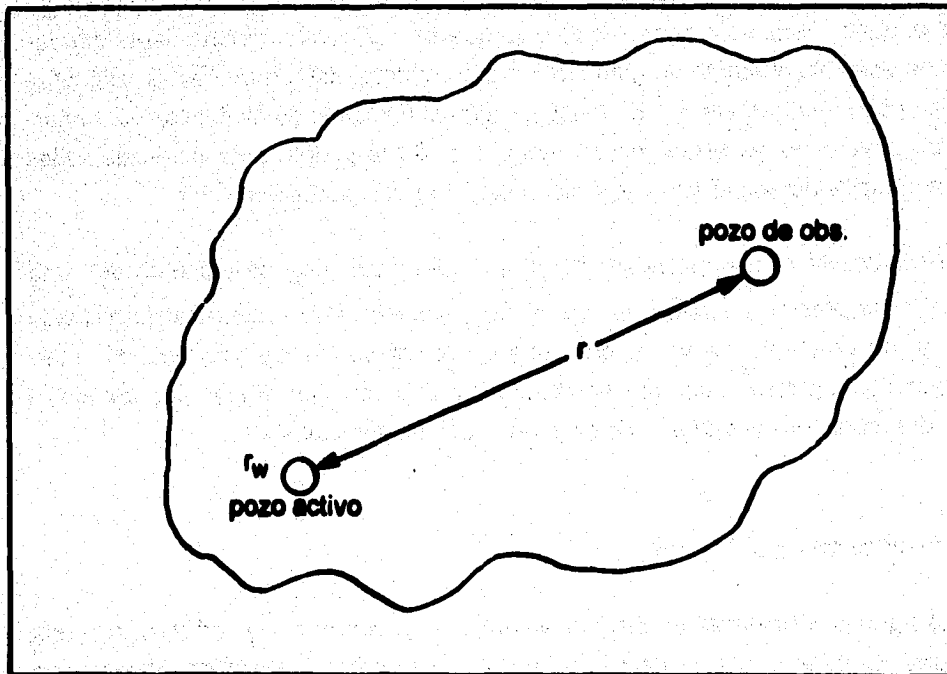


Figura 2.8.- Pozos que participan en una prueba de interferencia.

Al comparar los registros de los pozos involucrados en la prueba con las predicciones de modelos matemáticos adecuados es posible deducir los valores de los parámetros anteriormente citados. Esta comparación no puede hacerse en forma automática debido a la diversidad de situaciones que es posible encontrar en la naturaleza (yacimientos homogéneos, estratificados, de doble porosidad, en una fase, en dos fases, etc.) y a los errores asociados con los datos de entrada. El análisis de las pruebas de presión requiere por lo tanto del juicio técnico adquirido con la experiencia.

Pruebas de presión

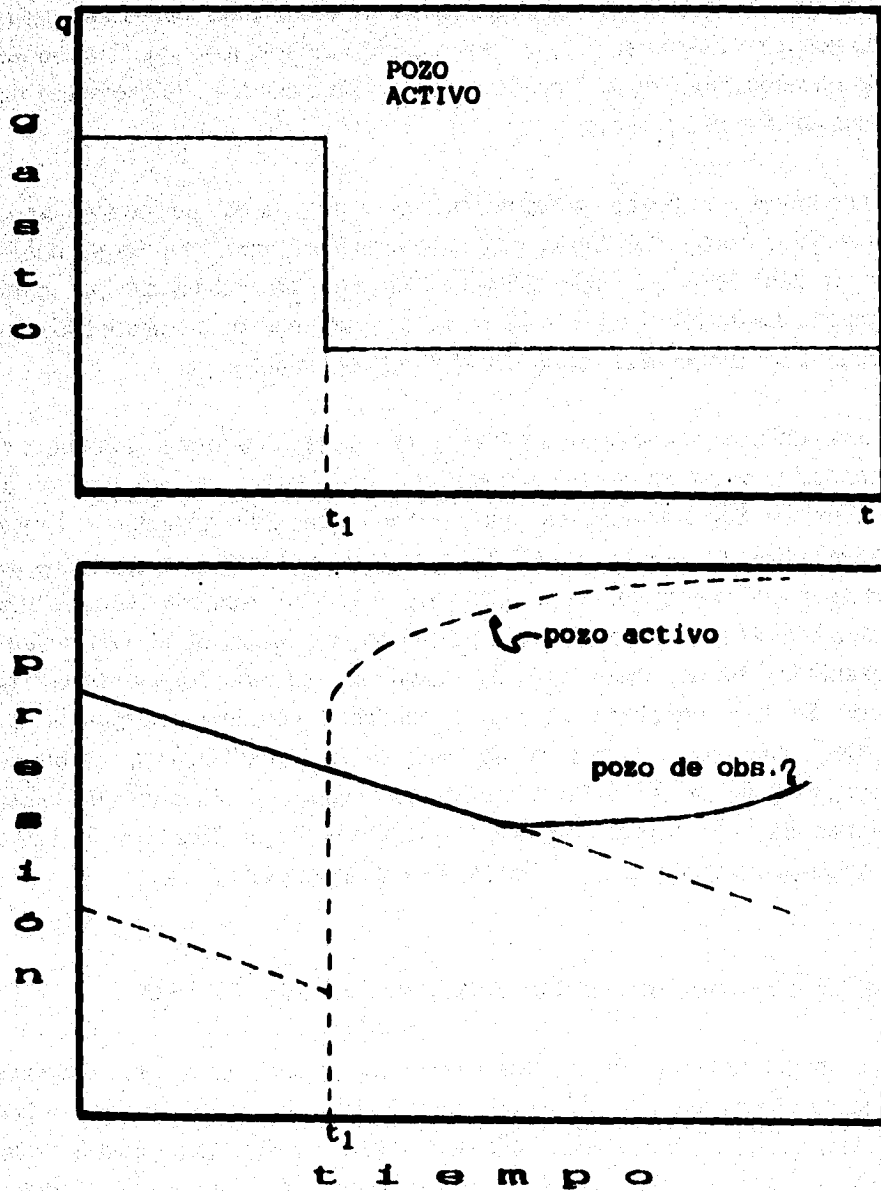


FIG. 2.9.- GASTO Y RESPUESTA DE LA PRESION PARA UNA PRUEBA DE INTERFERENCIA.

N.4.3.- PRUEBAS DE PRESION EN POZOS GEOTERMICOS DE VAPOR.

Los métodos establecidos en ingeniería para pruebas en pozos petroleros han sido aplicados acertadamente en pozos geotérmicos. Algunas modificaciones han sido necesarias debido a la diferencia en las propiedades y la geometría distinta de los campos geotérmicos.

Los análisis en pozos geotérmicos de vapor, tanto en pozos como en yacimientos fracturados, abarcan pruebas de decremento en formaciones convencionales. Estos han sido aplicados con éxito en análisis de los datos de campo de Larderello, Italia y los Geysers en California, los resultados fueron presentados por Barelli et al, Cinco Ley et al. y Economides et al.

Las publicaciones -Horner y Miller et. al.-, tienen una forma general y están reconocidas como las bases modernas de los análisis de pruebas en pozos geotérmicos. Son significativas contribuciones para poder entender los conceptos fundamentales hechos por Van Everdingen y Hurst y Matthews et. al. Los cuales fueron aplicados acertadamente a pozos geotérmicos. Notables son las publicaciones hechas por Ramey, Ramey y Gringarten y Barelli et. al. Los desarrollos presentados hasta ahora son de naturaleza general; tratándose con gas o vapor, se han requerido de varias modificaciones. Mientras que los fluidos líquidos tales como aceite o agua se miden frecuentemente en barriles el vapor es medido en libras. En el caso de gas y vapor, el valor de B (factor de volumen de la formación) experimentó rápidamente cambios bruscos. Las comparaciones son similares si se utiliza la ley de los gases reales.

N.5.- ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION CON CURVAS TIPO.

Por medio de las técnicas de ajuste con curvas tipo se pueden analizar los datos de presión dominados por efectos de almacenamiento. Una curva tipo es una familia de curvas de decremento de presión. Cuando una prueba de decremento es tan corta, tal que no se llega a la línea recta semilog. los datos no

Pruebas de presión

pueden ser analizados por un método convencional. En este caso se usan las técnicas de ajuste mediante curvas tipo. El método general se aplica a muchas clases de pruebas de pozos transitorios para algún sistema con P_D y t_D conocidas.

En la figura 2.10, fotográficamente, se ilustran los pasos que se deben de seguir para usar una curva tipo, aunque el proceso de curvas tipo parece difícil cuando se describe, es realmente sencillo al aplicarlo, el procedimiento se describe a continuación.

- 1.- Se selecciona la curva tipo adecuada, (para ilustrar el método se empleó la curva tipo de Ramey).
- 2.- Se sobrepone papel transparente sobre la curva tipo, se trazan las líneas principales de la malla y se marcan las mismas escalas de Δp y Δt .
- 3.- En el papel transparente se grafican los datos de Δp vs Δt para obtener la curva de datos (puntos graficados) garantizando así, que los datos graficados y la curva tipo tengan la misma escala.
- 4.- Se desliza el papel transparente de la curva de datos, manteniendo paralelos los ejes principales, hasta que la curva de datos coincida con alguna curva tipo.
- 5.- Se elige un punto de ajuste, se traza la curva y se escoge un punto conveniente sobre los datos graficados y se registran los valores correspondientes a este punto Δp , Δt , P_D y t_D , los datos ajustados se usan para estimar las propiedades de la formación. K , ϕ , kh/μ , c_t , S , etc.

Pruebas de presión

El método de análisis por curva tipo es sencillo rápido y exacto cuando se aplica la integral exponencial P_D ; esto es cuando:

$$r_w/r_o^2 > 0.20 \quad \text{y} \quad t_D/r_o^2 > 0.5$$

La forma más conocida de la ecuación de difusión es:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) = (\phi \mu c / K) \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) \dots\dots\dots(2.7)$$

que involucra las suposiciones adicionales de flujo crítico, sin variación vertical de la presión.

La solución de la ecuación de difusividad para flujo radial transitorio, conocida como "solución de línea fuente" es:

$$P_{(r,t)} = P_i - (q \mu) / (4 \pi k h) E_i [-(\phi \mu c_t r^2) / (4 k t)] \dots\dots\dots(2.8)$$

donde E_i es la función integral exponencial.

La solución de línea fuente en forma adimensional se puede expresar como:

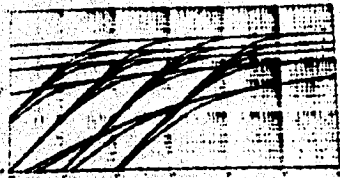
$$P_D = -1/2 E_i (-r_o^2 / 4 t_D) \dots\dots\dots(2.9)$$

los valores de E_i son negativos.

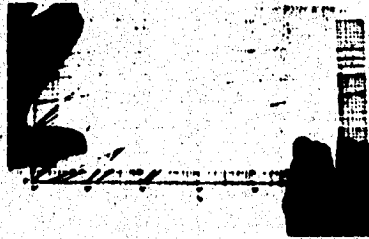
Esta solución involucra valores cualesquiera de los parámetros ϕ , K , μ , q , h , y C . En la figura 2.11 se presenta la gráfica de la ecuación anterior, se utilizan las unidades de p (psia), q (STBD), μ (cp), k (md), h (pie), r_w^2 (pie) y t (hr), con las expresiones correspondientes de P_D y t_D definidos por las ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6.

Pruebas de presión

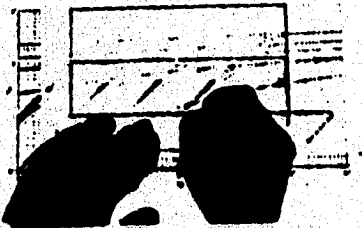
FIG. 2.10.- SECUENCIA DEL PROCEDIMIENTO PARA AJUSTE CON CURVAS TIPO.



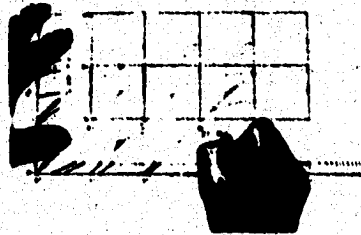
a) Se escoge la curva tipo.



b) Se sobrepone una hoja transparente.



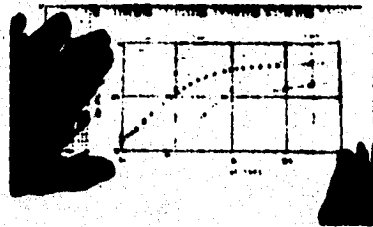
c) Se trazan los ejes principales de la cuadrícula.



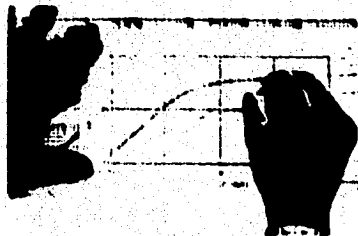
d) Se etiquetan los ejes.



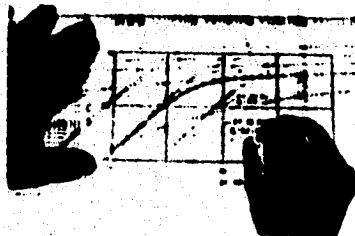
e) Se grafican los puntos observados usando la curva tipo.



f) Se desliza el papel transparente para ajustar los puntos a alguna curva tipo.



g) Se unen los puntos para obtener la curva ajustada.



h) Se anotan los puntos seleccionados.

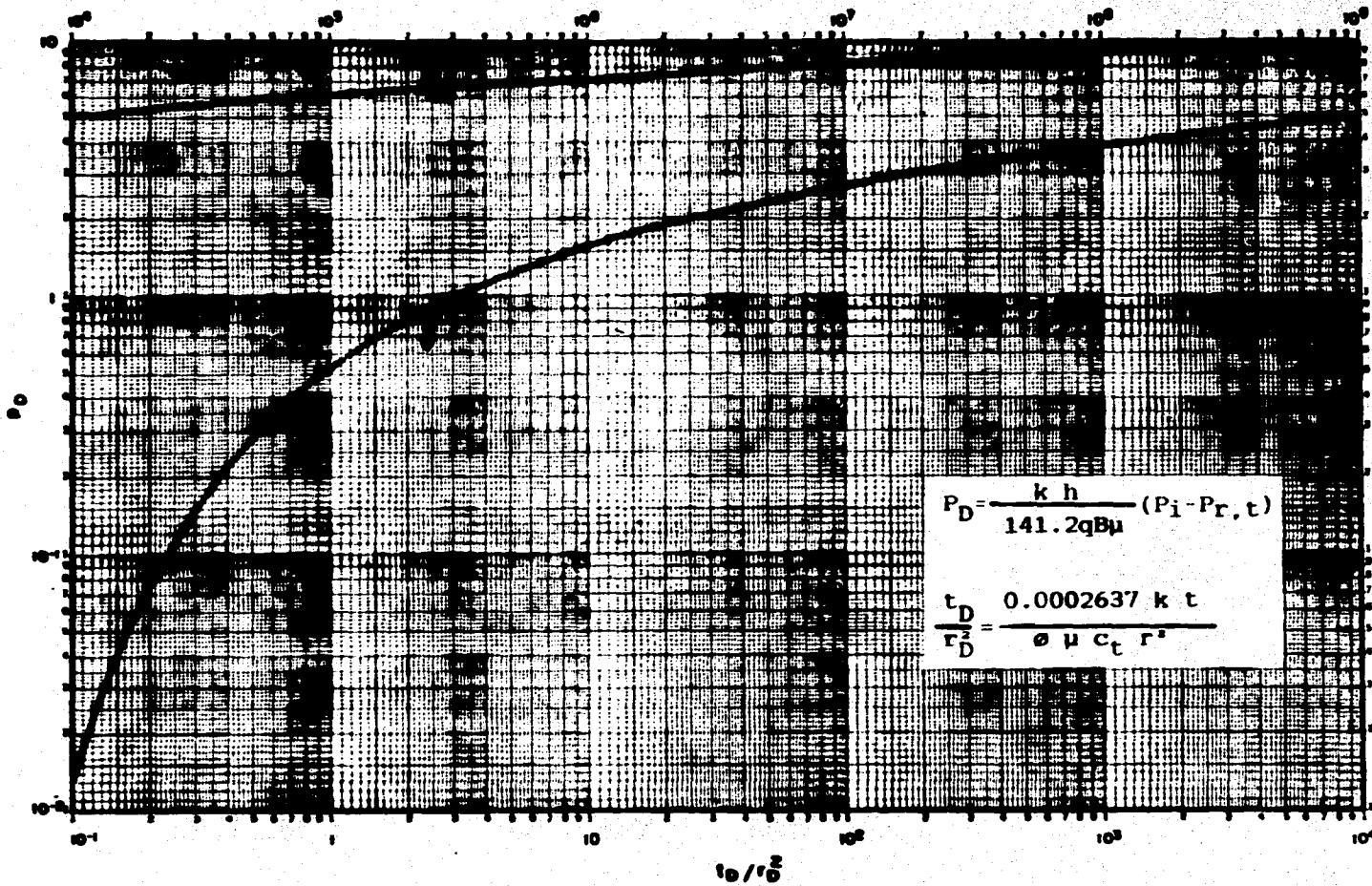


FIG.-2.11.- GRAFICA DE LA SOLUCION FUENTE LINEAL (EARLOUGHER)

Pruebas de presión

Los autores Miller-Witherspoon (Trans-AIME, 1965) encontraron los siguientes rangos de validez.

1.- La solución de línea fuente es válida para:

a) Todo valor de r_D , si: $t_D/r_D \geq 2.5$

b) todo valor de t_D/r_D , si: $r_D \geq 20$

para $t_D/r_D^2 > 100$ es válida la aproximación logarítmica la cual es:

$$P_D = 1/2 [\ln (t_D/r_D^2 + 0.00007)] \dots\dots\dots(2.10)$$

De los datos proporcionados se grafican a la misma escala que la figura 2.11, Δp vs t_D , de esta manera se obtienen los valores de t_D/r_D^2 y P_D , con los cuales se pueden determinar la transmisividad y coeficiente de almacenamiento de la siguiente manera:

+ Obtención de la Transmisividad.

Reordenando la ecuación (2.1).

$$P_D = (k h / \mu) [\Delta p / (141.2 q B)]$$

$$k h / \mu = (141.2 q B P_D) / \Delta p \dots\dots\dots(2.11)$$

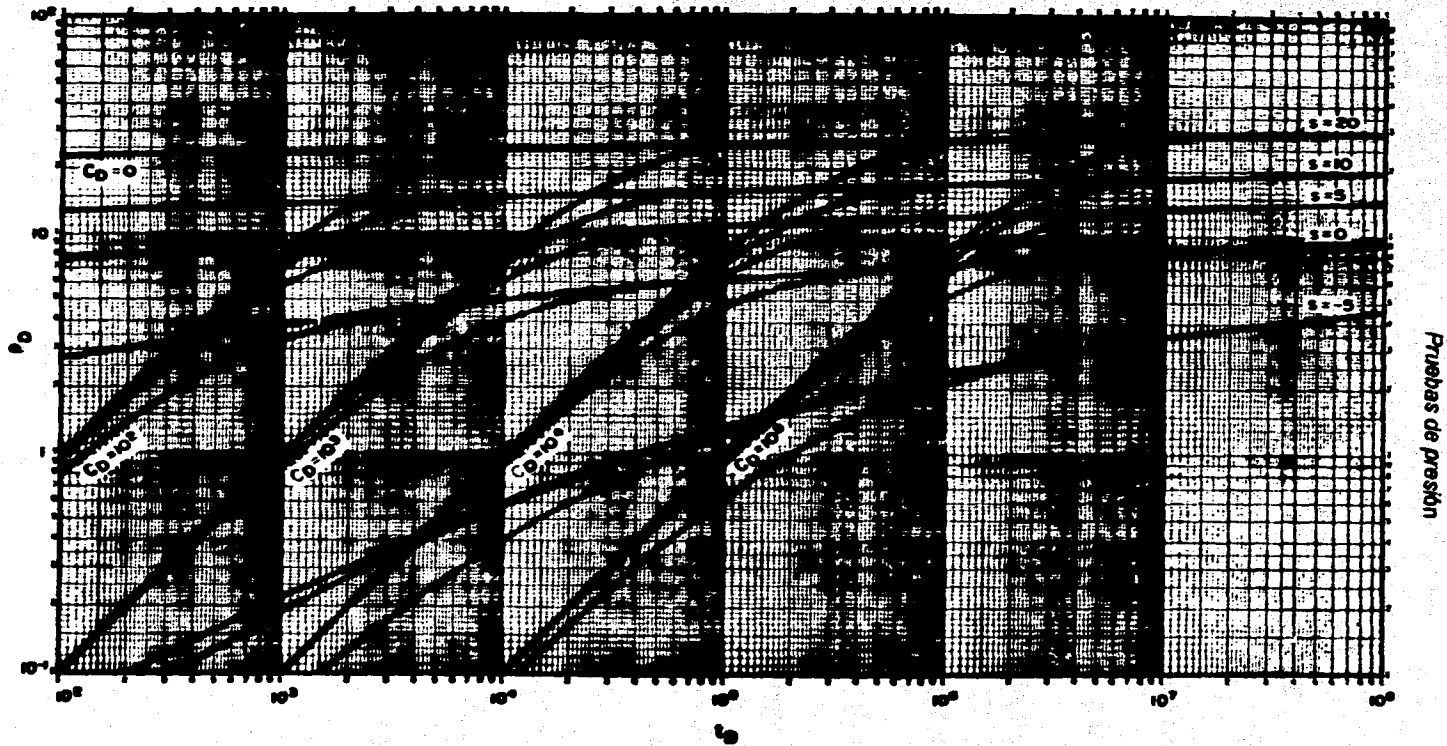


FIG. 2.12.- PRODUCCION ADIMENSIONAL PARA UN SOLO POZO CON ALMACENAMIENTO Y DAÑO EN UN YACIMIENTO INFINITO (RAMEY).

Pruebas de presión

+ Obtención del Coeficiente de almacenamiento.

Despejando r_w de la ecuación (2.3) se obtiene $r_w = r / r_D$; sustituyendo este valor en la ecuación (2.2) tenemos:

$$t_D / r_D^2 = (0.0002637 k t) / (\phi \mu c_t r^2)$$

multiplicando y dividiendo por h el numerador y denominador,

$$t_D / r_D^2 = (0.0002637 k t h) / (\phi \mu c_t r^2 h)$$

$$\phi c_t h = (0.0002637 k t h) / [(t_D / r_D^2) \mu r^2]$$

finalmente:

$$\phi c_t h = [(0.0002637 t) / (t_D / r_D^2) r^2] (k h / \mu) \dots (2.12)$$

e) Curvas tipo de RAMEY.

Estas curvas tipo representan la solución de la ecuación de difusividad, en forma adimensional, considerando simultáneamente los efectos de almacenamiento. Es una gráfica log-log de P_D vs t_D . (fig. 2.12) de gran utilidad para el análisis de datos de presión a tiempos distintos con la técnica de ajuste con curvas tipo.

II.6.- CONCLUSIONES.

Esta claro que las pruebas de presión en pozos de cualquier tipo, proporcionan información del estado de la formación productora, por lo que es conveniente analizar en forma adecuada todos los datos obtenidos de una prueba; los métodos esbozados en este capítulo proporcionan solamente las técnicas básicas de análisis, para casos más complejos se deben emplear técnicas apropiadas. Las curvas tipo deben usarse sólo cuando las técnicas de análisis convencional no puedan ser empleadas, en tales casos, el análisis por curvas tipo pueden proporcionar resultados aproximados. Actualmente, el uso de computadoras y las técnicas desarrolladas dentro de este campo permiten, con un menor margen de error, interpretar los datos medidos en una prueba de presión, así como el manejo de casos muy complejos, que sin una técnica computarizada resultarían extremadamente difíciles de analizar.

CAPITULO III

SISTEMAS EXPERTOS

III.1 .- INTRODUCCION.

Aprender es mejorar nuestro conocimiento acerca de la estructura de nuestro entorno. El ser humano está programado para aprender y durante toda su vida tiende a adoptar una actitud activa en búsqueda de información. Una computadora, en cambio, no posee un programa de búsqueda y aprendizaje general. Por este motivo las tentativas a realizar programas capaces de aprender se han limitado a campos precisos, pequeños y fijados de antemano. ¿Cuál es actualmente la capacidad cognocitiva de las computadoras y los robots? ¿Pueden "pensar", "querer" o "decidir", o incluso ser "creativos"? Todo parece indicar que sí. No sólo pueden vencer a los mejores jugadores de ajedrez, sino que los espectaculares sistemas expertos pueden procesar datos e inclusive "conocimientos" en diálogo con el usuario. Por ejemplo:

- elaboran diagnósticos médicos de alto nivel;
- proporcionan asesoría bancaria y analizan el mercado de valores y créditos;
- diagnostican fallas en complejos sistemas técnicos;
- ayudan a geólogos y compañías petroleras en la búsqueda de reservas rentables de petróleo.

Puesto que sólo unas pocas personas son capaces de realizar este tipo de tareas, se consideran a menudo más difíciles que las actividades corrientes,

tales como percepción y comprensión del lenguaje natural. Pero se ha demostrado que varios de estos problemas pueden resolverse mediante programas usualmente llamados **Sistemas Expertos (SE)**. Estos aplican técnicas de razonamiento de **Inteligencia Artificial (IA)** a la resolución de problemas en áreas específicas para simular el comportamiento de expertos humanos. En teoría, estos sistemas son capaces de razonar siguiendo pasos comparables a los que sigue un especialista (médico, geólogo, etc), cuando resuelve un problema propio de su disciplina. En este sentido falta un experto humano, que transmita sus conocimientos al sistema, y un usuario humano que se sirva del sistema experto para resolver sus propios problemas con la eficiencia de un especialista y, tal vez, para adquirir una destreza análoga a la del experto mediante la observación del comportamiento del sistema.

III.2.- INTELIGENCIA ARTIFICIAL.

Aunque la mayoría de intentos para definir con precisión los complejos y amplios términos anteriores son ejercicios fútiles, es útil esbozar como mínimo una frontera aproximada alrededor del concepto para proporcionar una perspectiva, he aquí como la definen algunos expertos:

- 1) Para M. Minsky profesor del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), «la Inteligencia Artificial, es la ciencia de hacer máquinas que hagan cosas que realizadas por el hombre requieran el uso de inteligencia».
- 2) No obstante, P. H. Winston director del Laboratorio de IA del MIT escribe: «El objetivo de la IA se puede definir como, conseguir hacer computadoras más útiles para comprender los principios que hacen posible la inteligencia».
- 3) M. Nilson jefe del Departamento de Ciencia de Computadoras de la Universidad de Stanford dice: «El campo de la IA tiene su principal

Sistemas Expertos

contenido en aquellos procesos comunes que reúnen percepción y conocimiento, amén que el proceso pueda ser comprendido y estudiado científicamente».

4) Tanto B. G. Buchanan (profesor adjunto e investigador de ciencia de computadoras) como E. A. Feigenbaum (investigador principal del proyecto de Investigación sobre Heurística), ambos de la Universidad de Stanford, escriben «la investigación sobre la IA es la parte de la ciencia de computadoras que investiga procesos simbólicos, razonamientos no algorítmicos y representaciones simbólicas de conocimiento usados en máquinas inteligentes».

Otra definición que no está en absoluto aceptada universalmente (E. Rich 1988), pero que permite esbozar una frontera aproximada alrededor del concepto es: «IA es el estudio de cómo lograr que las computadoras hagan cosas que por el momento, las personas hacen mejor», esta definición debería proporcionar un buen esquema de lo que constituye la IA y evitar los debates filosóficos que dominaron los intentos de definir el significado de artificial o de inteligencia. Naturalmente es algo efímera debido a que se hace referencia al estado actual de la ciencia de la computadoras. Sin embargo, la rapidez con la que puede variar el significado de esta definición no es en absoluto tanta como pudiera pensarse. De hecho, la constatación de lo lento que es el progreso hacia computadoras que puedan sustituir a las personas en tareas difíciles, fue uno de los primeros resultados que surgieron de la IA experimental.

III.2.1 El nacimiento de la Inteligencia Artificial.

Así como de alguna forma, los soportes mecánicos para la automatización de cálculos aritméticos se sitúan en la prehistoria de las computadoras, la prehistoria de la IA, abarca desde los primeros tiempos de nuestra civilización hasta mediados del siglo veinte. Unos de los primeros problemas de IA que se estudiaron fueron los juegos y las demostraciones de teoremas, éstos, compartían

la propiedad de que, aunque se consideraba que las personas capaces de hacerlo bien mostraban inteligencia, parecía que las computadoras podrían realizarlos correctamente por el simple hecho de ser más rápidos al explorar un gran número de caminos de solución y seleccionar el mejor. Parecía que este proceso requería muy poco conocimiento y podía ser programado fácilmente. Esta suposición resultó ser falsa. Ninguna computadora es lo suficientemente rápida para superar la explosión combinatoria generada por tales problemas.

En 1950 Alan Turing presentó una comunicación sobre el tema de la IA, titulado *Inteligencia y Funcionamiento de Máquinas*. En este trabajo propone un test ("test de Turing") para determinar cuándo una máquina posee IA. «En el juego de imitación de Turing, participan tres personas: un hombre A, una mujer B y un interrogador C, de uno u otro sexo, que se sitúa en una habitación aparte y ha de determinar cuál de los otros dos es el hombre y cuál es la mujer. Para ello C puede plantear a A y B preguntas, que responderán de forma que la vía de comunicación no sirva de ayuda al interrogador. A y B no están obligados a decir la verdad. Si C no es capaz de descubrir el sexo en un tiempo razonable, se considera que ha perdido el juego». Ahora se plantea la pregunta: ¿Qué sucede cuando una máquina sustituye a A en el juego? ¿Se equivocará tanto el interrogador como lo hace cuando en el juego participan un hombre y una mujer? Si así fuera, se podría hablar de una «máquina pensante»; podríamos decir que habíamos conseguido una manifestación de inteligencia artificial. En un trabajo anterior Turing sugirió que debía simularse el comportamiento del cerebro humano.

Destaquemos también que a mediados de los años cincuenta John McCarthy, y posteriormente el MIT, diseñaron el lenguaje LISP (List Processing). De todas formas, La Conferencia de Darmouth (año 1956) acuñaba la expresión "Inteligencia Artificial" y predice que al cabo de 25 años las computadoras harían todo el trabajo de los seres humanos; y 1958 Newell y Simon aseguraban que en 1968 una computadora sería campeón mundial de ajedrez y habría demostrado algún teorema importante de las matemáticas.

Hacia 1957 Newell Shaw y Simon comienzan a desarrollar el resolvente de problemas generales (GPS). Este programa aplica técnicas de resolución codificada para resolver diferentes problemas ambientales; y en 1959 Gelemter escribió su programa para resolver problemas de geometría elemental. Slage comenzaba en el MIT la automatización de la integración simbólica con su programa SAINT, origen de lo que unos años más tarde sería el programa MACSYMA.

Sobre 1959 y después de años de experimentación, Arthur Samuel completó un programa de ordenador, verificador de juegos en un trabajo titulado, *Estudios en máquinas de aprendizaje usando el juego del ajedrez*, publicado en el IBM Journal of Reseach and Development. De todas formas, el resultado más espectacular de este período fue el programa de Samuel para jugar a las damas, que se presentó en 1961 y era capaz de aprender de su experiencia, es decir, tener en cuenta sus errores y éxitos pasados, para determinar sus jugadas en una partida posterior.

Bajo la dirección de E. A. Feigenbaum y J. Feldman se publicó en 1963 la colección ordenadores y razonamiento; en ella aparece el artículo de M. Minsky, *Pasos hacia la IA*, en el año 1964 se publicó la tesis doctoral de D. G. Bobrow sobre su sistema STUDENT, que es un programa de lenguaje natural que comprende y resuelve problemas elevados de álgebra. Posteriormente (en 1965), la Universidad Stanford empezó a investigar sobre SE con su *Proyecto de Programación Heurística (HPP)*, dentro de los laboratorios del departamento de ciencia de ordenadores de dicha Universidad. Actualmente, el HPP forma parte del Laboratorio de Sistemas de Conocimiento cuyo investigador principal es E. A. Feigenbaum. En este año se comienzan también los trabajos de investigación sobre el primer SE: el DENDRAL desarrollado también en la Universidad de Stanford por un grupo en el que estaba J. Lederberg, E. A. Eigenbaum, B. G. Buchanan y otros, DENDRAL analiza información sobre componentes químicos para determinar su estructura.

Sistemas Expertos

Es en 1966 cuando se publica, en Comunicaciones de la Asociación para Máquinas Calculadoras, un programa de computadora para el estudio de comunicación hombre-máquina mediante lenguaje natural interactivo, ELIZA, que fue creado por Weizenbaum como un programa de psicología que simula las respuestas de un terapeuta en diálogo interactivo con un paciente. También en el año de 1966 R. D. Greenblat empieza a desarrollar una computadora para jugar al ajedrez capaz de competir con éxito en torneos. Fue bautizado como *programa de ajedrez de Greenblat*, por los Proceedings de la Conferencia de la AFIPS.

Fue a partir de 1969 cuando se produjo la «institucionalización» de la comunidad científica que trabajaba en IA, al tener lugar el Primer Congreso Internacional de IA; de este modo las comunicaciones antes dispersas por los Congresos de Informática y Lingüística, etc., pudieron presentarse en conjunto ante un auditorio más homogéneo. Y así, en 1970 apareció el primer número de la revista IA, que desde entonces publica trabajos acerca de las más destacadas investigaciones en curso. Por otra parte, aparecieron los primeros sistemas expertos como el MYCIN o el PROSPECTOR. Los sistemas expertos alcanzaron una sorprendente efectividad a la hora de responder a complicadas cuestiones de diagnóstico médico o prospección minera.

Hacia 1972 W. Woods (B. Beranek Inc.) desarrollo un sistema de recuperación de la información para un sistema gramatical de lenguaje natural (LUNAR), que utilizaron los geólogos para evaluar los materiales traídos de la luna por la misión Apolo 11. En 1976, D. B. Lenat escribe el AM, un programa típico de aprendizaje que define y evalúa conceptos matemáticos con teoría de conjuntos y números. También R. Davis publica su tesis doctoral, en la Universidad de Stanford, sobre un sistema, TERESIAS, que usa metaniveles de conocimiento para entrar y actualizar bases de conocimiento usadas en sistemas expertos. Un año después se completa la primera de una serie de aplicaciones de un SE usando el lenguaje PROLOG, el cual se llevo a cabo en el Instituto Húngaro para la Coordinación de la Computación (SZKI). En el año de 1978 R. O. Duda, publicó un trabajo sobre un SE, PROSPECTOR, que ayuda al análisis de la información relacionada con las exploraciones geológicas.

Sistemas Expertos

En 1981 se publicaba el informe elaborado con las contribuciones de unas 150 personas, aprobando el gobierno japonés los créditos presupuestarios para lo que se llamó el *Proyecto de la Quinta Generación de Ordenadores*. En noviembre de 1984 se celebró una Conferencia Internacional sobre la Quinta Generación. Sus actas muestran los resultados conseguidos hasta ahora por el proyecto, las dificultades y los próximos pasos que se darán.

III.2.2.- Areas de la Inteligencia Artificial.

La percepción del mundo que nos rodea es crucial para nuestra supervivencia. Animales con mucho menos inteligencia que las personas, son capaces de una percepción visual más sofisticada que las máquinas actuales. Los primeros esfuerzos respecto a la percepción visual simple y estática se bifurcaron en dos direcciones: hacia el reconocimiento de modelos estadísticos y hacia sistemas más flexibles de comprensión de la imagen. A causa de las diferencias en la flexibilidad de estos dos enfoques, sólo el último es considerado típicamente como perteneciente a la esfera de la IA. Las tareas de percepción son difíciles porque involucran señales analógicas en vez de digitales, porque las señales típicas son muy ruidosas y porque, usualmente, deben percibirse un gran número de cosas a la vez (algunas de las cuales pueden ocultar parcialmente a las otras).

Las aplicaciones tecnológicas en los métodos de IA usados han demostrado con éxito que pueden resolver complicados problemas de forma masiva, se han desarrollado sistemas que:

- 1.- Permiten al usuario preguntar a una base de datos en cualquier lenguaje que sea, mejor que un lenguaje de programación.
- 2.- Reconocen objetos de una escena por medio de aparatos de visión.
- 3.- Generan palabras reconocibles como humanas desde textos computerizados.

Sistemas Expertos

4.- Reconocen e interpretan un pequeño vocabulario de palabras humanas.

5.- Resuelven problemas en una variedad de campos usando conocimientos expertos codificados.

Las aplicaciones más primarias de la IA se clasifican en cuatro campos: *sistemas expertos, lenguaje natural, robótica y visión, sistemas sensores y programación automática*. La siguiente lista contiene un sumario de algunos de los problemas que caen dentro del radio de acción de la IA:

- + Juegos
- + Demostración de teorías
- + Resolución general de problemas
- + Percepción
 - Visión
 - Habla
- + Comprensión del lenguaje natural
- + Resolución de problemas expertos
 - Matemática simbólica
 - Diagnóstico médico
 - Análisis químico
 - Diseño en ingeniería

III.2.3.- Técnicas de la Inteligencia Artificial.

No existe una división estricta entre las técnicas de la IA y las utilizadas en el cálculo convencional. En el cálculo convencional, un programador crea un programa de instrucciones para el computador que sigue un camino de solución para cada situación; este camino está completamente planeado por el programador. Cualquier sorpresa en el transcurso del proceso es un error que debe ser eliminado. Este método convencional, de usar pasos predecibles, puede ser muy potente ya que capacita para resolver problemas que requieren el

procesamiento de una gran cantidad de datos y la repetición de muchos pasos. A lo largo de los años se han hecho progresos en el cálculo convencional. Primero, se pueden ejecutar muy rápidamente con hardware disponible. Segundo, se han reducido el tiempo y los esfuerzos requeridos para escribir los programas por el desarrollo de conjuntos de instrucciones y lenguajes de programación que requieren del programador escribir pocas líneas de código. Sin embargo, muchos problemas importantes no se resuelven fácilmente por el cálculo convencional, aunque la velocidad de ejecución sea muy rápida. Estos problemas incluyen decisiones basadas en la interacción compleja de muchos factores que deben ser considerados como un todo, más que como una serie de pasos. Pero la IA utiliza una técnica que es útil en la solución de estos problemas complejos: el procesamiento simbólico. Los símbolos procesados por los programas de la IA a menudo representan entidades del mundo real, y en lugar de ejecutar simplemente cálculos, los programas de IA manipulan o «piensan» sobre las relaciones entre los símbolos.

En el procesamiento de datos tradicional, el sistema procesa el contenido de variables. Los sistemas de IA pueden hacer esto, pero pueden también manipular símbolos independientemente de sus valores esto hace posible resolver un problema cuando el valor de una variable no se conoce hasta un momento antes de que la respuesta sea necesaria. Por ejemplo, un automóvil que se está construyendo debe tener un color, pero dicho color no es importante hasta que se entregue.

En proceso de datos, es el programador, no la máquina, quien determina todas las relaciones entre los símbolos pero en el procesamiento de símbolos en un sistema basado en IA, el programa puede determinar las relaciones entre los símbolos que no estaban establecidas explícitamente por el programador. Esta manipulación de relaciones entre parte de los datos es una característica importante de la programación en IA.

En la resolución de la mayor parte de los problemas de IA, el diseño de la solución no puede ser conocido de antemano. En lugar de eso, se recurre a una

Sistemas Expertos

programación exploratoria, usando varias técnicas de resolución e intentando producir una solución prototipo para una pequeña parte del problema de manera rápida.

Mejorando continuamente la capacidad del prototipo, el diseñador moldea el diseño para un sistema que por fin acaba haciendo lo que se pensaba. Los resultados del uso del sistema permiten a los usuarios proporcionar realimentación en la ejecución del trabajo. La realimentación se usa entonces para mejorar la ejecución, y el proceso continúa hasta que el sistema alcanza el nivel deseado. Un beneficio adicional del último prototipo es que el sistema es capaz de mostrar sus utilidades y limitaciones potenciales, antes de que una gran cantidad de recursos se hayan puesto en juego. Un proyecto que no va a producir claramente los resultados pedidos puede ser detenido antes de que consuma una mayor cantidad de recursos.

III.2.4.- Desarrollo de sistemas de inteligencia artificial

El mejor método de desarrollo de un prototipo al que se le puede aplicar las técnicas de IA, es determinar la estructura del problema y las herramientas disponibles. Las herramientas consisten básicamente en varios métodos de representación del conocimiento y operadores, estructuras de control, lenguajes de IA, utilidades integradas (editores, depuradores, herramientas de gestión de códigos, gestión de pruebas, etc.) y hardware.

Representación del conocimiento.

Los investigadores de IA han creado una variedad de representaciones diferentes para los distintos tipos de conocimiento y no una simple, cerrada y de finitiva representación. El objetivo es elegir una representación que facilite el trabajo en una tarea particular. Esto se puede extender para combinar diferentes representaciones dentro de un sólo sistema, o, desarrollar una nueva represen-

Sistemas Expertos

tación o una variación de alguna existente si se ajusta mejor al dominio del problema. El problema mismo se puede solucionar usando representación, varios operadores y estrategias de control.

Facilidades de explicación.

Muchos sistemas de IA siguen caminos complicados, explorando muchos estados, usando muchas reglas, etc., y no es inmediatamente obvio para el usuario la forma en que razonó el sistema su camino de búsqueda. Por eso es útil prepararlo para que explique o justifique su razonamiento. Entonces, el usuario puede evaluar si el sistema está trabajando fiabemente o necesita alguna revisión. Esta es una característica muy importante de muchos SE. La mayoría de las aplicaciones consisten en un listado de pasos tomados a través del espacio-problema, y muchos incluyen la razón por la que se tomaron aquellos pasos.

Estrategias de control.

Las estrategias del control se usan para activar sistemáticamente procedimientos en el sistema. Los procedimientos tienen varios propósitos. Algunos ejecutan operaciones sobre los datos, otros preparan un método para ejecutar operaciones, y otros muestran que ninguno de los objetivos anteriores se pueden encontrar.

Los procedimientos controlan algunas veces otros procedimientos; esto es, un procedimiento puede llamar a otros procedimientos, si es necesario. O el control puede ser atribuido a objetos que apuntan a los procedimientos para usarlos con esos objetos. El control puede manejarse permitiendo procedimientos voluntarios en respuesta a demandas del sistema, siendo elegido el más apropiado.

Factores de confianza.

Los factores de confianza o certeza se usan con un SE para proporcionar un índice de la solidez con la que un SE soporta su conclusión final. Los factores de confianza se expresan generalmente como una fracción decimal entre 0 y 1, inclusive; eso estima como definitiva una parte de información usada por el sistema.

En sistemas reales, los factores se combinan por medio de algunas aplicaciones *ad hoc* de la teoría probabilística. A menudo, el tipo de factor de confianza se deriva y se propaga en un SE, de manera que puede ser tan fiable como las predicciones del tiempo a largo plazo. Sin embargo, donde se asignan valores de confianza creíbles y razonables, se aplican algoritmos bien entendidos; estos factores se pueden usar tanto para ayudar a guiar al proceso de búsqueda, como para evaluar la fuerza de la conclusión obtenida por el sistema de IA. La cuestión importante a formularse al mirar un sistema que use factores de confianza o cálculo probabilístico, es lo susceptible que es la capacidad de solución de un problema a los valores elegidos.

III.2.6.- Los lenguajes de la inteligencia artificial.

Los programas de IA se depuran primeramente con procedimiento simbólico mejor que con cálculo numérico; por eso se puede esperar que los lenguajes para trabajar en IA tendrán características de las que se usan tradicionalmente para procesamiento de datos. Y aunque es posible trabajar en IA con estos últimos, los investigadores han desarrollado lenguajes especiales que facilitan la programación en IA.

Las características que hacen que algunas aplicaciones se procesen eficientemente, son improcedentes en otras y en algunas contraproducentes. También los programadores tienen distintos criterios para la elección de un lenguaje óptimo dependiendo de sus estilos personales. Además exigen a

aquéllos, que faciliten la manipulación de listados, para poder acomodar una amplia variedad de tipos de datos con modos de operación interactivos, así como ajustes de modelos y con métodos de inferencia que pueden ser programados automáticamente para deducir y tomar decisiones automáticas para almacenar posteriormente los resultados.

Se puede hacer una programación orientada a objeto con cualquier lenguaje de programación aunque hay algunos que hacen más fácil esta tarea. Los lenguajes utilizados para programar en IA son variados entre los más utilizados están: LISP, que en cierta manera es un veterano que se diseñó para manejo de símbolos de forma análoga a como se hizo con el FORTRAN para cálculo numérico. El PROLOG, que originalmente fue desarrollado como un lenguaje de programación en LÓGica, es también interactivo, y fue diseñado para usarse en sistemas de procesamiento de lenguaje natural, aunque también es útil para CAD aplicado en arquitecturas, sistemas expertos y construcción de bases de datos; se diseñó como un autómeta que busca a través de una base de datos o de un campo estructurado en árbol. El OPS5 se creó en la Universidad de Carnegie-Mellon para sistemas de producción basados en SE, aún cuando no se le considera propiamente un lenguaje de uso general como el LISP o el PROLOG, etc.,

A pesar de todos los avances en IA, solamente unas pocas técnicas importantes se han abierto camino rápidamente en el mundo de la programación de computadoras. Hay dos principales razones para esto. Primero, la mayoría de los programadores no tienen más que conocimientos básicos y formales sobre inteligencia artificial. En segundo lugar, mientras que la mayoría de las investigaciones en IA se hacen en base a lenguajes específicos tales como el LISP y el PROLOG la mayoría de las aplicaciones reales, como son los paquetes de contabilidad o los procesadores de textos están escritos en un lenguaje común, como es el caso del lenguaje C.

El SE que se describe en este trabajo, a excepción del módulo de cálculo que está en FORTRAN 77, se encuentra escrito en lenguaje C. El C es uno de los

lenguajes de programación más populares en uso. Proporciona una estructura sin límite a la creatividad del programador; además, los compiladores C producen programas muy rápidos y eficientes al ejecutarlos. Por estas y otras razones muchos paquetes de software están escritos en C. Ya que hay más programadores que conocen C que los que conocen algunos otros lenguajes normalmente usados en investigación en IA.

No hay ni siquiera una sola técnica de IA que no pueda ser desarrollada usando un lenguaje de procedimiento como lo es el C. De hecho, el desarrollo de ciertas rutinas es, en verdad, más claro en C que en un lenguaje de IA.

Aprender a desarrollar varios elementos de IA a través del C es importante porque estos elementos pueden adaptarse a un gran número de aplicaciones existentes. Muchas aplicaciones han sido y continuarán siendo escritas en C y pueden beneficiarse de la suma de los distintos avances basados en la IA.

III.2.6.- Tendencias Futuras.

¿Qué ocurrirá en los próximos años en el campo de la IA? Es siempre arriesgado predecir el desarrollo de una ciencia, y más de ésta, que tantas veces ha dejado en evidencia a muchos que han intentado predecir sus avances.

De cualquier forma, parece claro que el impulso adquirido en los últimos años es imperable. Hemos de asistir a continuos y rápidos progresos. Para conseguir metas más ambiciosas, como la comprensión del lenguaje natural o la visión artificial, parece que habrá que buscar nuevas arquitecturas y nuevos conceptos informáticos. Este es el camino que sigue el proyecto de la quinta generación que, independientemente de su éxito o fracaso final hará progresar notablemente las tecnologías asociadas.

En la vida cotidiana, la inteligencia artificial tendrá un impacto cada vez mayor. La mejora de la comunicación hombre-máquina, difundirá las computadoras

mucho más de lo que están ya, en el hogar, la oficina, etc. Como consecuencia algunos como Feigenbaum, han predicho la desaparición de los programadores profesionales, innecesarios cuando cualquier usuario pueda «hablar» cómodamente con el ordenador.

¿Y qué ocurrirá a más largo plazo? ¿Hasta que punto resultará verdadera la hipótesis del sistema de símbolos físicos? ¿Veremos una máquina que supere el «test de Turing»? Sólo el tiempo lo dirá.

III.3.- SISTEMAS EXPERTOS.

Hasta ahora, la mayoría de los programas de IA se han diseñado para realizar tareas de razonamiento de "sentido común", tareas que cualquier persona podría realizar fácilmente. Sin embargo, existen muchísimas áreas interesantes que requieren gran cantidad de conocimiento especializado que no posee la mayoría de la gente. Estas tareas sólo pueden realizarse aquéllos expertos que hayan acumulado el conocimiento requerido, ejemplos de tales tareas incluyen el diagnóstico médico, el diseño electrónico y el análisis científico. Los programas que realicen dichas tareas serían muy útiles, puesto que suele haber una falta de expertos humanos calificados. Estos programas son los SE y su construcción se llama "Ingeniería del conocimiento".

En los llamados «sistemas expertos» se encuentran almacenados datos y reglas concernientes a determinada rama del saber que se utilizan en combinación con un "sistema de resolución de problemas". Este combina las reglas entre sí durante el diálogo y saca conclusiones. Estas pueden ser incorporadas a una base de conocimientos como nuevas reglas. Es así como el programa «aprende». La mayor dificultad reside en transmitirle a los SE la información necesaria. No siempre es posible crear reglas a partir de conocimientos que no son muy concretos, que frecuentemente estén basados en la experiencia y son utilizados manera intuitiva.

A pesar de que aún no existe una metodología universalmente aceptada para la concepción de un SE, los especialistas en la materia coinciden en admitir un esquema general de tres fases. En la primera, mediante discusiones con el experto humano, se intenta delimitar el problema y los modos de razonamiento puesto en práctica para su resolución. En la segunda fase se estudia el formalismo de representación del conocimiento y el programa que va a utilizar los conocimientos para la solución del problema específico (máquina de inferencias). Finalmente, se escribe el conocimiento del campo de interés (base de conocimientos), se prueba y se pone a punto con la ayuda de casos cuya solución es conocida.

En el transcurso de su vida, los hombres adquieren una experiencia de la que la mayoría de las veces no son conscientes; ésta experiencia es la que tratan de capturar y utilizar los SE. Entre otros logros, los sistemas expertos pueden:

- 1) Actuar como localizadores de averías en equipos de enseñanza.
- 2) Asesorar medicamente sobre tratamiento de sospechosos de meningitis y otras infecciones bacterianas en la sangre.
- 3) Deducir la localización de grandes depósitos de molibdeno.
- 4) Configurar sistemas complicados de cálculo en la fracción de tiempo requerida por el ingeniero experimentado.

Algunos SE, entre ellos los sistemas tradicionales, suministran contestaciones en términos de medidas fiables, propagando a través del programa grados de certidumbres asociados a partes de información. Se tardaron varios años en conseguir que un SE fuese rápido y ese tiempo se redujo conforme los que trabajaban en su desarrollo ganaron familiaridad con los métodos para desarrollarlos, así como con el «hard» y el «soft» que posibilitan el proceso de desarrollos ulteriores.

III.3.1.- Ingeniería del Conocimiento.

La metodología general de construcción de un SE consiste en la obtención de información a partir de:

- a) Consulta de documentos
- b) Entrevistas con expertos de unidades de conocimiento formuladas según las características del paradigma en cada caso.

Como ya se mencionó, el conjunto de técnicas (métodos personales +instrumentación) y criterios tendentes a producir esta incorporación de conocimiento procesable por los distintos paradigmas, se denomina actualmente «ingeniería del conocimiento» y constituye un concepto paralelo de la metodología de la programación en las aplicaciones clásicas. Por ello, para hacer posible esta ingeniería, es preciso seleccionar los paradigmas no sólo basados en sus valores teóricos de representación, sino también en criterios de:

Constructividad: deben incorporar conceptos suficientemente inteligibles y correlativos de la forma de entender de los expertos en el tema, y, al propio tiempo, debe poder construirse de manera incremental, es decir, por progresiva incorporación de conocimiento sobre distintas versiones sucesivas.

Operatividad: deben ser evaluables por un procedimiento efectivo y por el máximo de contenido teórico para resolver la clase de problemas que es objeto de presentación en el paradigma.

Por otra parte, la aparición de una nueva arquitectura de sistema informático organizada en base a una estructura representativa del conocimiento y un procedimiento de interpretación como semántica de dicha estructura, ha producido un cambio cualitativo en el diseño informático, anteriormente basado en estructuras de datos y procedimientos para cálculo de funciones a partir de ellos. Para construir este tipo de sistemas es preciso contar con:

LIBRO DE ACTAS
1981
1982

Sistemas Expertos

- 1) **Paradigmas de representación del conocimiento** que sean capaces de incorporar en su estructura un grado de complejidad suficiente para la clase de problemas a resolver por el sistema.
- 2) **Procedimientos de interpretación**, capaces de obtener las respuestas según modelos de razonamiento apoyados en la representación anterior.
- 3) **Métodos efectivos de adquisición de conocimiento**.

Los dos primeros aspectos han sido objetos de desarrollo teórico importantes, aunque actualmente todos los paradigmas existentes son objetos de crítica. Sin embargo, se presta poca importancia al tercero que, por otro lado, es crítico para la construcción de sistemas en el mundo real, ya que, de nada sirve un concepto teórico de representación y el procedimiento semántico correspondiente, si no lleva consigo un método efectivo de construcción que garantice la facilidad de traslación del conocimiento de personas expertas a los esquemas de representación.

III.3.2.- Sistemas expertos básicos.

Hay un contraste entre las técnicas tradicionales de proceso de datos y las técnicas de resolución y razonamiento en IA. Mientras las primeras usan cálculo numérico con algoritmos comprensibles, que usados correctamente producen respuestas correctas, las segundas permiten a los SE extraer conclusiones que no estaban programadas en ellos explícitamente. Se detallan algunas técnicas y elementos que hacen posible realizar inferencias novedosas en SE: adquisición de conocimientos, heurística, métodos de representación de conocimiento y máquinas de inferencia.

- 1) **La adquisición del conocimiento** es el proceso para extraer y formalizar el conocimiento de un experto y usarlo en un SE.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- 2) *La heurística* son reglas empíricas concernientes a una determinada área que un investigador aprende o descubre.
- 3) *Una representación de conocimiento* es una estructura normal con un conjunto de operaciones que expresan descripciones, relaciones y procedimientos que un experto proporciona a un SE.
- 4) *Una máquina de inferencia* es un protocolo de un programa para pilotar y resolver un programa, entre reglas y datos, en una representación del conocimiento.

III.3.3.- Los sistemas expertos en la realidad.

Un problema se presta a ser considerado como un sistema experto cuando:

- 1) Una solución del problema tiene una rentabilidad tan alta que justifica el desarrollo de un sistema, pues las soluciones son necesidades del área y no se ha trabajado en otros métodos para obtenerla.
- 2) El problema puede resolverse sólo por un conocimiento experto que puede dar forma a los conocimientos necesarios para resolver el problema, y la intervención de este experto dará al sistema la experiencia que necesita.
- 3) El problema puede resolverse solamente por un conocimiento experto en vez de usar algoritmos particulares.
- 4) El problema puede no tener una solución única. Los SE funcionan mejor con problemas que tienen un cierto número de soluciones aceptables.
- 5) El problema cambia rápidamente, o bien el conocimiento es el que cambia rápidamente o sus soluciones son las que cambian constantemente.

El desarrollo de un SE no se considera que está acabado una vez que funciona éste, sino que se continúan desarrollando y actualizando tanto el conocimiento del sistema como los métodos de procesamiento quedando reflejados los progresos o modificaciones en el campo, área o sistema.

III.3.4 .- Construcción de un sistema experto.

La característica más importante de un sistema experto es que se funda en una gran base de conocimientos. Puesto que una gran cantidad de conocimientos es tan crítica para el éxito del SE, la cuestión de cómo vamos a representar ese conocimiento para el diseño del sistema también lo es. La construcción de un SE requiere una serie de fases (figura 3.1). Cada una de las cuales comporta unos objetivos, una metodología y unas herramientas específicas.

Análisis del problema.

De acuerdo con los requerimientos del usuario, los recursos disponibles y las características del problema, se fijan los objetivos generales y las tareas específicas que deben ser realizadas por el sistema experto. El resultado de esta fase es el proyecto de construcción del SE. El ingeniero debe evaluar cada tarea, proponer los recursos necesarios, y establecer un calendario para el desarrollo de las diferentes etapas. Los útiles de ayuda de esta fase pueden concebirse en dos niveles:

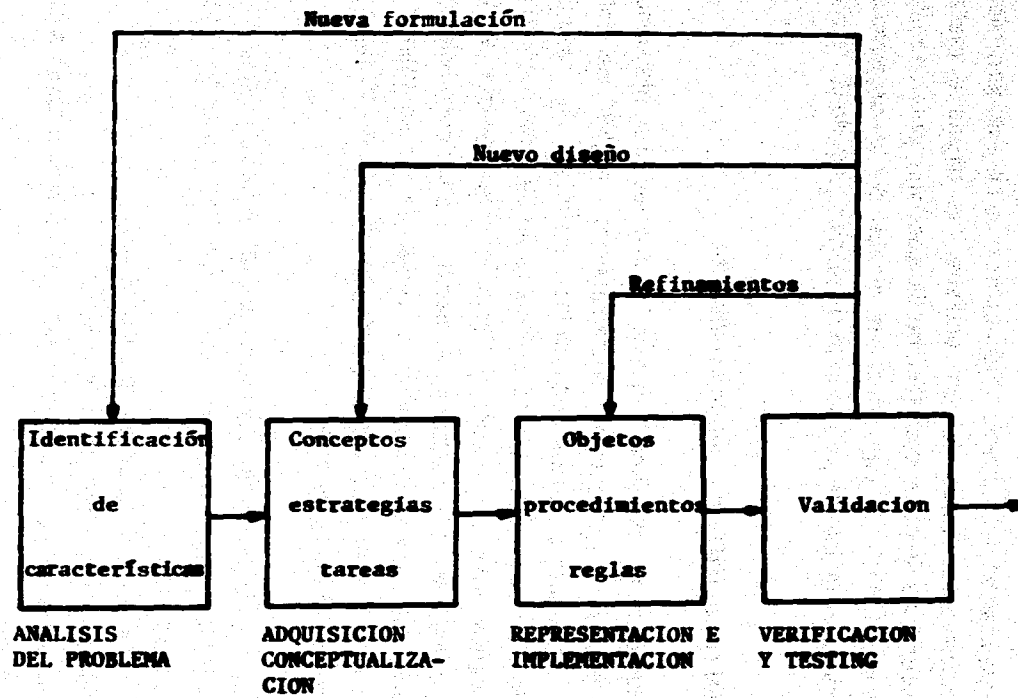


Figura 3.1.- Ciclo de construcción de un sistema experto.

1) **Ayuda a la escritura del proyecto.** Se trata de sistemas formados por editores textuales y gráficos orientados a facilitar la expresión de los distintos elementos que intervienen en la organización de un proyecto (tareas, diagramas, calendario, etc.).

2) **Ayuda a la organización del proyecto.** Podría pensarse en una herramienta que utilizara el conocimiento acerca de los recursos, las tareas a realizar, las restricciones específicas de cada tarea (tiempo de ejecución, prioridad, etc.) para aconsejar al *identificador de características* acerca de la organización del proyecto, la asignación óptima de los recursos, la planificación de las tareas, etc.

Adquisición del conocimiento y conceptualización.

El objetivo consiste en identificar todos los elementos que intervienen en la solución del problema (conceptos, procedimientos, reglas de inferencia, conocimientos heurísticos, casos especiales, métodos de razonamiento, restricciones, etc.). La información puede obtenerse de distintas fuentes. Diálogo directo con expertos, información escrita (libros, informes, revistas, etc.), datos empíricos proporcionados por aparatos de medida o por observaciones, datos gráficos (imágenes, dibujos, diagramas, etc.). A medida que se obtiene el conocimiento es necesario depurarlo, seleccionando los conceptos básicos que harán posible el funcionamiento del sistema.

La realización de esta fase implica llevar a cabo diferentes procesos:

- 1.- Análisis del conjunto de informaciones que proporcionan las fuentes del conocimiento.
- 2.- Abstracción para la obtención de conceptos.
- 3.- Selección y clasificación de la información.
- 4.- Inferencia de nuevos conceptos, relaciones o propiedades a partir de los ya existentes.
- 5.- Generalización a partir de casos concretos.
- 6.- Inducción, etc.

En la práctica, la adquisición del conocimiento requiere una buena metodología y, sobre todo, gran habilidad y experiencia por parte del ingeniero. Es, sin duda, la fase más completa del ciclo en donde las ayudas son más necesarias. Para ello es preciso que las herramientas sean capaces de realizar todos o parte de los procesos que realiza el ingeniero: Interrogar con habilidad y paciencia a los expertos en el área de aplicación, extraer información de textos, clasificar y filtrar datos, etc.

Formalización y representación del conocimiento.

La actividad del constructor del SE en esta fase se concreta en las siguientes tareas:

- 1.- *Elección de un formalismo de representación del conocimiento.*
- 2.- *Elección de una arquitectura que permita coordinar y manejar los distintos tipos de elementos que intervienen en la solución del problema (objetos específicos del dominio-problema, reglas de inferencia, tareas, etc.).*
- 3.- *Creación de la base de conocimientos utilizando el formalismo y la arquitectura elegida.*
- 4.- *Diseño de la interfaz del SE con el usuario y con el resto del entorno lógico (bases de datos, sensores, etc.).*

Herramientas de ayuda a la implementación y prueba del SE.

Las herramientas pertenecientes a esta categoría realizan diferentes funciones como:

Ayudar al proceso de validación y prueba. Los errores en un SE se detectan de distintas formas: conclusiones falsas, respuestas inconexas a preguntas, deducción de hechos irrelevantes o no encontrar la solución a los problemas previstos.

La fuente común de los errores se encuentra casi siempre en la definición de la *Base de Conocimientos (BC)*: objetos, reglas, relaciones, procedimientos o tareas incorrectas, que son la causa del mal funcionamiento del sistema. Las herramientas orientadas a facilitar el proceso de validación permiten al ingeniero:

- 1.- Detectar las inconsistencias derivadas de la definición de la BC.
- 2.- Localizar objetos, relaciones o propiedades que faltan en la BC.
- 3.- Obtener trazas de los procesos de inferencia.
- 4.- Interrogar al sistema de la forma selectiva acerca de la obtención de determinados resultados.
- 5.- Funciones para evaluar la velocidad del cálculo y para mejorar la implementación de los diferentes objetos sin variar su definición.

III.3.5 .- Interacción con un sistema experto.

Para que un sistema experto sea una herramienta efectiva, la gente debe poder interaccionar fácilmente con él. Para facilitar esta interacción es importante que un SE tenga las dos capacidades siguientes, además de la capacidad de realizar la tarea subyacente:

• *Explicar su razonamiento.* En la mayoría de dominios en los que operan los SE, la gente no aceptará los resultados a menos que estén convencidos de la precisión del proceso de razonamiento que los produjo. Esto es particularmente cierto, por ejemplo, en medicina, en donde un médico debe aceptar la responsabilidad última de un diagnóstico, aunque se hubiese llegado a este con una considerable cantidad de ayuda por parte de un programa. Así pues, es importante que el proceso de razonamiento usado en los programas proceda en pasos comprensibles y se disponga de bastante metaconocimiento (conocimiento sobre el proceso de razonamiento) de los pasos que puedan generarse.

• *Adquirir nuevo conocimiento y modificar el conocimiento antiguo.* Puesto que los sistemas expertos derivan su potencia de la riqueza de la BC que explotan,

es extremadamente importante que dichas bases de conocimientos sean tan completas y precisas como sea posible. Pero con frecuencia no existen codificaciones normalizadas de este conocimiento; éste sólo existe en las mentes de los expertos. Por lo tanto, la única forma de entrar dicho conocimiento en el programa es a través de la interacción con el experto humano.

III.3.6 .- Arquitectura de un sistema experto.

Como se mencionó anteriormente un SE está soportado por una base de conocimientos de una área específica del saber. Generalmente, este conocimiento está organizado como una colección de reglas, las cuales le permiten al sistema obtener conclusiones a partir de datos o premisas. Esta representación nos permite cambiar la arquitectura tradicional:

Datos + Algoritmo = Programa

por una arquitectura centrada alrededor de una BC y de una "máquina de inferencias" de tal manera que podemos escribir:

Conocimientos + Inferencia = Sistemas

la cual es claramente similar a la anterior, pero suficientemente diferente como para tener profundas consecuencias. Además de la BC y de la máquina de inferencias, es común que los sistemas expertos cuenten con un módulo de ayuda para la adquisición de conocimientos, y justificar sus elecciones (figura 3.2).

Base de conocimientos.

La base de conocimientos contiene la información específica del campo de interés. Esta debe escribirse en un lenguaje de representación de conocimientos tal que, el experto humano pueda expresar su propio vocabulario. Probablemente la manera más común de encapsular conocimientos es por medio de las llamadas

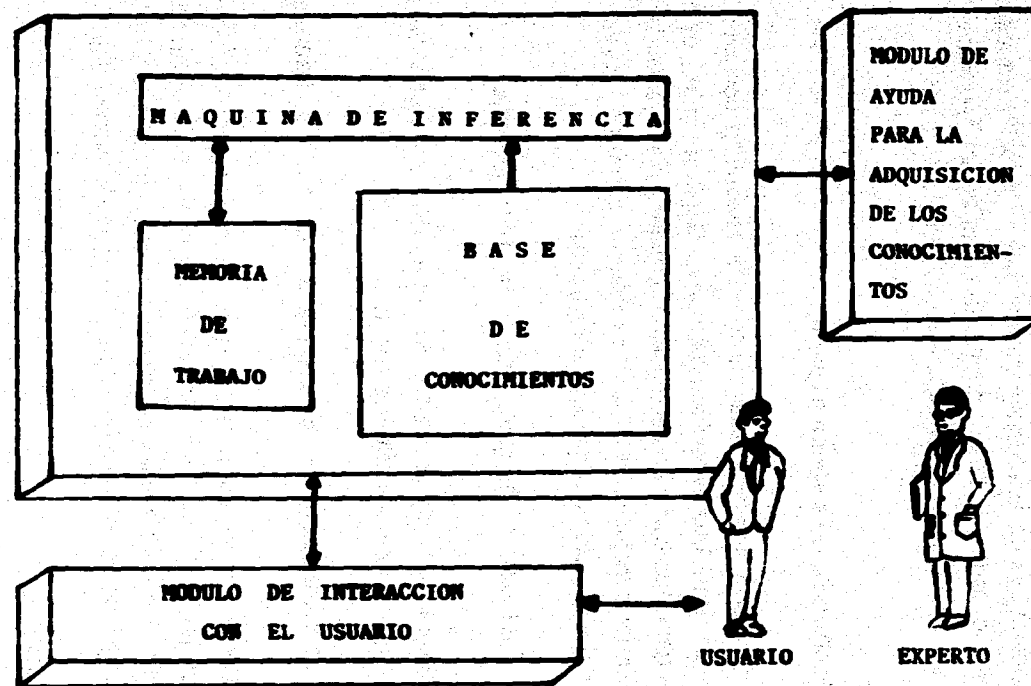


FIG. 3.2 ARQUITECTURA DE UN SISTEMA EXPERTO TÍPICO

reglas de producción. Estas pueden tener los bien conocidos datos IF-THEN o WHEN-THEN (Myers, 1986). Sin embargo, las reglas de producción no son la única manera de representar los conocimientos. Algunos SE han usado árboles de decisión, redes semánticas, etc. (Forsyth, 1984).

Máquina de inferencias.

La máquina de inferencias, es un programa que utiliza los conocimientos y la experiencia contenidos en la BC, para resolver un problema específico. Como ya se mencionó, en la mayor parte de los casos la base de conocimientos esta constituida por reglas del tipo IF-THEN, las cuales expresan que cuando el argumento de IF es válido, puede deducirse el argumento de THEN. En este caso la máquina de inferencias selecciona, valida y pone en acción alguna de estas reglas a fin de llegar a la solución del problema planteado.

Módulo de adquisición de conocimientos.

El creador de un sistema experto empieza por identificar y recoger del experto humano los conocimientos que éste utiliza, los cuales pueden ser, en general, de dos tipos: teóricos o empíricos. El adquirir conocimientos empíricos puede ser un verdadero reto, ya que es frecuente que el experto sea incapaz de formular un saber que para él es evidente. Con objeto de facilitar esta etapa del desarrollo del SE, se han desarrollado herramientas que ayudan a la adquisición del conocimiento. Entre éstas se encuentran los programas "Teiresias" (Lenz, 1982) y "Mirlitho" (Ganascia, 1983) que sirve para detectar las anomalías de la BC. Su función puede ser tanto prevenir errores en el transcurso de la escritura de reglas, como permitir al experto modificar sus reglas durante el transcurso de una sesión, en vista de los resultados internos y del comportamiento del sistema.

Existen otras herramientas para la adquisición de conocimientos las cuales son más ambiciosas que las anteriores, propone adquirir directamente las reglas a partir de la observación del ejemplo. El papel del experto humano se reduce en este caso, a dar al SE los problemas tipo y la solución que parece óptima.

Módulo de explicación.

Decir que los SE «razonan» como expertos humanos significa que hay un parecido entre los pasos que seguirá un especialista para abordar un problema determinado y los pasos que sigue el sistema para abordar el mismo problema. Con este objeto, el sistema ha de poder justificar en cualquier momento su comportamiento en términos explícitos. Deberá de explicar los pasos que dá y los resultados a que llega en términos comprensibles para un usuario, tanto si es especialista en esa materia, como si es simplemente un curioso que desea instruirse. La credibilidad del sistema se incrementará grandemente si es capaz de explicar al usuario la línea de razonamiento que lo llevó a un determinado resultado.

Como puede verse, los sistemas expertos son poderosas herramientas capaces, no sólo de ejecutar un saber, sino también de transmitirlo. Adicionalmente, constituyen hoy en día una manera de almacenar un conocimiento probablemente mal definido e impreciso, sin embargo valioso, que hasta hace poco tiempo se perdía.

III.4 .- CONCLUSION.

Desde mitad de los sesenta, cuando se empezó a trabajar con los primeros de los que ahora llamamos SE, se ha progresado mucho en la construcción de tales programas. La experiencia obtenida con estos esfuerzos sugiere las siguientes conclusiones:

Sistemas Expertos

- **Estos sistemas derivan su potencia de una gran cantidad de conocimientos específicos del dominio, más que de una única técnica potente.**
- **El conocimiento requerido, lo es sobre un área concreta y está bien definido. Esto contrasta con la clase de conocimiento amplio y difícil de definir que llamamos sentido común. Es más fácil construir sistemas expertos que los de sentido común.**
- **Un sistema experto no puede construirse sin la ayuda de, por lo menos, un experto, que debe estar dispuesto a gastar gran cantidad de esfuerzo para transferir su experiencia al sistema.**
- **Esta transferencia de conocimientos tendrá lugar gradualmente durante muchas interacciones entre el experto y el sistema. El experto nunca proporcionará el conocimiento correcto o completo la primera vez.**
- **La cantidad de conocimiento requerido depende de la tarea. Puede ir, desde algunas decenas de reglas a más de mil.**
- **La elección de una estructura de control para un sistema depende de las características específicas de éste.**
- **Es posible extraer las partes que no pertenecen al dominio específico de los sistemas más expertos existentes y usarlas como herramientas para construir otros en nuevos dominios.**

Aunque los factores apunten a un futuro optimista, los principales problemas están aun por resolver. Los entornos existentes en el mercado están formados por herramientas orientadas básicamente a la edición, a la representación estática de los elementos que intervienen en la solución del problema, a la implementación de objetos, en trazado de procesos de inferencia y a la implementación de la

interfaz con el usuario. Todas ellas permiten resolver aspectos relativamente secundarios del ciclo de construcción del SE; la generación de herramientas capaces de proporcionar al ingeniero una asistencia «inteligente» está todavía por construir. Como son sistemas capaces de colaborar con él en las fases más complejas del ciclo, concretamente en la adquisición, conceptualización y representación del conocimiento.

CAPITULO IV

DESCRIPCION DEL SISTEMA EXPERTO ANAPPRES.

IV.1.- INTRODUCCION.

En este capítulo se describen las características más importantes del sistema experto **ANAPPRES** (**ANALizador de Pruebas de PRESión**), que es un sistema experto computarizado, desarrollado para analizar pruebas de presión en yacimientos homogéneos saturados con líquido. **ANAPPRES** fue desarrollado para efectuar el análisis de pruebas transitorias de presión en las que pueden intervenir un número arbitrario, tanto de pozos activos como de observación, en sistema homogéneos saturados con fluido monofásico. Combina exitosamente técnicas de inteligencia artificial, modelos matemáticos, técnicas de optimización y conocimientos heurísticos para llevar a cabo el análisis de la prueba. Con el modelo matemático y las técnicas de optimización, estima los parámetros de la formación (transmisividad y coeficiente de almacenamiento entre otros), a partir de los cuales puede determinar, utilizando una serie de criterios y conocimientos heurísticos, si existen fronteras hidrológicas y el tipo de éstas. Finalmente, y en caso de que se haya detectado frontera, procede a calcular su localización. En varias etapas del análisis **ANAPPRES** cuenta con capacidades gráficas y de explicación de cómo ha llegado a una conclusión determinada.

IV.2.- SISTEMA EXPERTO "ANAPPRES".

Para analizar pruebas de presión, la técnica gráfica de utilizar curvas-tipo (p. e. Earlougher, 1977), fue un método estándar durante muchos años. Estas técni-

casos tenían muchas desventajas y estaban restringidas a ser empleadas en casos relativamente sencillos y requerían de juicios subjetivos para el ajuste de curvas y de una amplia experiencia en la parte del análisis. La popularización de las computadoras digitales trajo consigo técnicas computarizadas de análisis (p.e. Earlougher y Kerseh, 1972; Mc Edwards y Benson, 1981). Estas técnicas, mediante el uso de correlaciones, mínimos cuadrados y programación no lineal, eliminaron la subjetividad previamente asociada con ajustes y observaciones a un modelo y proporcionaron la posibilidad de estudiar sistemas complicados y el manejo de una gran cantidad de datos.

ANAPPRES, es una poderosa herramienta tecnológica del estado del arte, la cual provee a los especialistas en ingeniería de yacimientos de una valiosa alternativa en el análisis de pruebas de presión, su capacidad para correr en una computadora personal lo hace aceptable para un gran número de usuarios y se tienen facilidades para ser empleado en áreas afines, incluye software gráfico, es amigable con el usuario, no se requiere de una amplia experiencia en la parte del análisis. Una de sus características principales son los avances didácticos para los usuarios que no están muy experimentados, está provisto de una capacidad de verificación para análisis expertos y aumenta la confianza en el sistema. Entre otras ventajas sobre los métodos convencionales destacan:

- 1.- Maneja gasto variable.
- 2.- Es capaz de determinar más de tres parámetros simultáneamente.
- 3.- Le toma significativamente menos tiempo que a un experto humano, el efectuar el análisis de una prueba determinada.
- 4.- Puede analizar problemas con un número arbitrario de pozos de observación, lo que es prácticamente imposible sin una técnica computarizada.

IV.3.- HARDWARE Y SOFTWARE.

ANAPPRES fue diseñado para utilizarse en PC's tipo XT y AT con procesador 80386 y mayores. Siendo este un programa computacionalmente intensivo, su funcionamiento es significativamente rápido, porque utiliza un co-procesador numérico. Sus gráficos requieren de targetas EGA o VGA compatibles, asimismo se necesita también de un disco fijo. El dispositivo de salida emplea una impresora de matriz de punto de las más comúnmente usadas, (p. e. IBM graphics, EPSON MX80) o impresora laser (p.e. QMS Kiss) y un graficador HP-7475A. Con excepción del módulo de cálculo (el cual está escrito en Fortran 77), ANAPPRES está escrito en lenguaje C. Las primeras versiones de este sistema, tenían una menor capacidad (Arellano et al. 1989, 1990), estas primeras versiones estuvieron enfocadas para utilizarse en instalaciones VAX., lo que no las hacía atractivas a los usuarios.

IV.4.- ARQUITECTURA DE ANAPPRES.

La arquitectura desarrollada para ANAPPRES busca obtener un buen nivel de comunicación entre los programas que realizan los cálculos requeridos para el análisis y los programas que emulan el razonamiento que seguiría un experto humano al llevar a cabo un análisis de este tipo. En general, las herramientas que existen actualmente para desarrollar sistemas expertos, tales como KEE (Intellicorp, 1988), OPS5 (Forgy, 1981), etc; no son adecuadas para efectuar este tipo de acoplamientos ya que han sido diseñadas para ayudar en el desarrollo de "Sistemas Inteligentes Aislados", los cuales trabajan por si mismos sin recibir soporte de otros sistemas tales como bases de datos especializadas, algoritmos numéricos, etc. El problema básico que existe al utilizar una de estas herramientas en la solución de problemas que requieren del empleo de algoritmos numéricos, es la comunicación entre códigos escritos en lenguajes diferentes. Por un lado se tiene a los códigos escritos en lenguajes simbólicos, los cuales han sido diseñados para representar el conocimiento de reglas heurísticas, y por otro lado se tienen códigos escritos en lenguajes

científicos (Fortran, Pascal, etc.), que han sido diseñados para manipulación numérica. Actualmente no existe una metodología totalmente desarrollada para tratar este tipo de problemas (Morales, et al. 1986). Por esta razón, en el desarrollo del SE para analizar pruebas de presión, en lugar de utilizar alguna de las herramientas citadas, se prefirió desarrollar un programa de computadora que estuviera escrito en el mismo lenguaje que el módulo de cálculo (*ANALIZE*), el cual había sido desarrollada con anterioridad (Mc Edwards y Benson, 1981). De esta manera fue posible tener un buen nivel de comunicación entre los diversos módulos que constituyen el sistema experto.

La arquitectura de ANAPPRES se observa en la figura 4.1. Está formada por cinco módulos principalmente, cuatro de ellos (La interfase con el usuario, el módulo de cálculo, la base de conocimiento y el módulo de explicación) están ligados a la central de la máquina de inferencias, la cual es la unidad del análisis. Las funciones de los distintos módulos se describen a continuación.

IV.4.1 .- Interfase Hombre-Máquina.

Una vez que los archivos de datos han sido creados, el usuario podrá llamar a ejecución al programa ANAPPRES , iniciándose de esta manera el análisis de la prueba. El usuario interactúa directamente con el módulo denominado interfase *hombre-máquina*, cuya función es la de proporcionar un ambiente de comunicación amistoso entre el usuario y el sistema experto. En general, el tipo de comunicación que se establece es el de *pregunta-respuesta*. Por esta razón se han incorporado a la interfase extensos chequeos de validación de las respuestas del usuario. Si el usuario comete algún error, primeramente se le hace notar, esto por medio de una alarma y después se le da nuevamente la oportunidad de cargar la información. Las principales funciones de esta interfase (representados en la figura 4.1 por módulos individuales) son: la generación de los menús requeridos, la escritura de los resultados y diagnósticos del análisis, la generación de gráficas y la presentación de las explicaciones correspondientes.

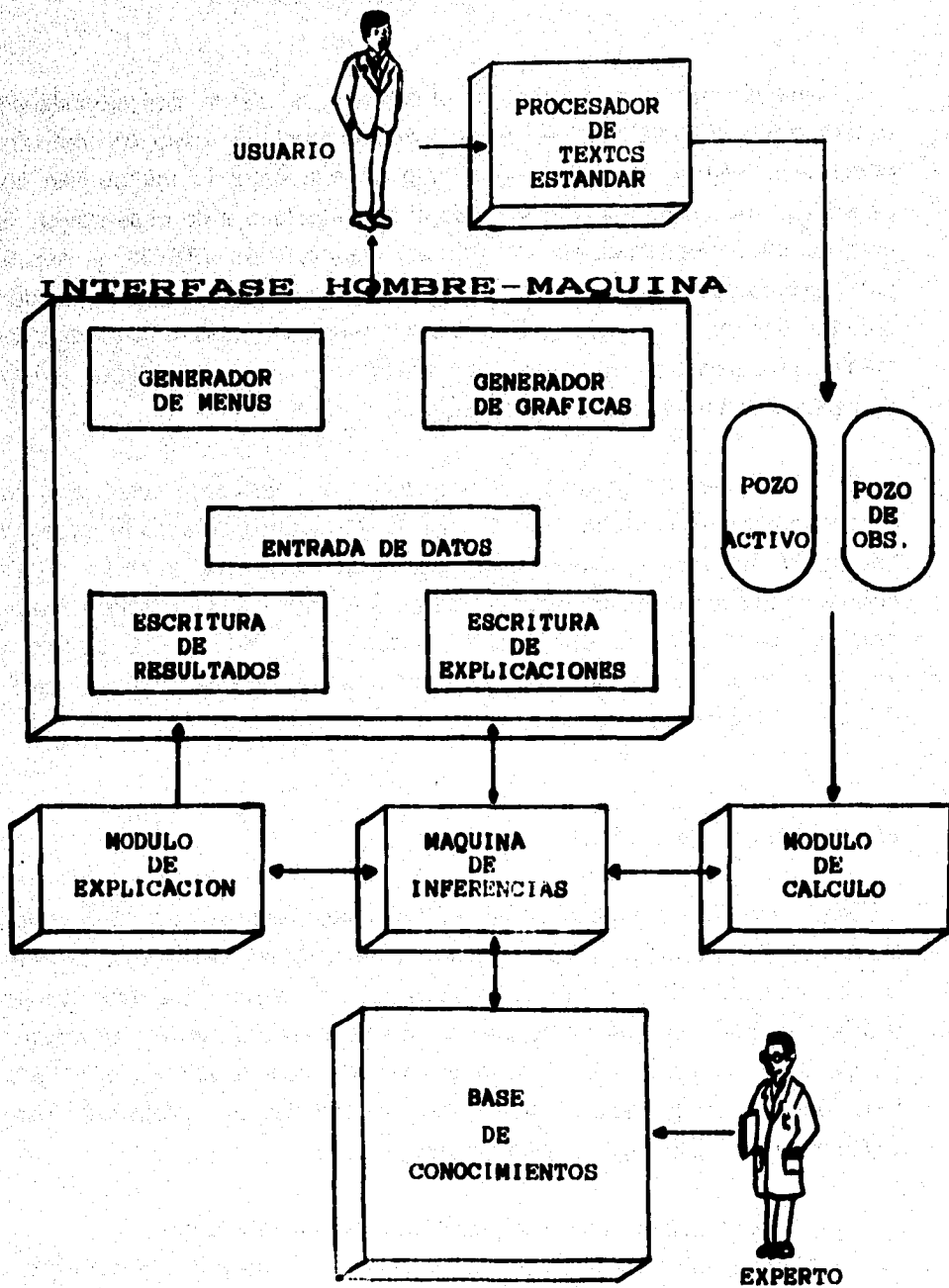


FIG. 4.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA EXPERTO "ANAPPRES"

En caso de que no se cuente con el archivo de datos correspondiente, el usuario puede proporcionar éstos en forma manual, en caso contrario se proporciona el nombre del archivo en el que se encuentra la información obtenida en las pruebas de los pozos, ya sean de desarrollo o de observación. Estos archivos deben estructurarse en formatos específicos (ASCII) y son leídos directamente desde el módulo de cálculo; los archivos de entrada pueden ser creados dentro de un ambiente amistoso, mediante hojas tipo y otros instrumentos provistos por ANAPPRES (función de entrada de datos fig. 4.1) o empleando un procesador de textos externo.

El generador de gráficos, proporciona las gráficas con los datos proporcionados (presión vs tiempo y gasto vs tiempo) para cada pozo, localización de los pozos que están participando en la prueba. Además, ANAPPRES cuenta con la capacidad de mostrar una comparación gráfica entre los datos de presión medidos y los resultados obtenidos por el módulo de cálculo y la localización de las fronteras con respecto a los pozos participantes, (ver figura 4.2, datos medidos vs modelo).

IV.4.2.- Módulo de Cálculo.

Esta es una versión modificada del programa de cálculo ANALIZE (Mc Edwards y Benson, 1981), el cual fue desarrollado para efectuar análisis de pruebas de presión en pozos de una sola fase (líquido), en yacimientos homogéneos e isotrópicos, para analizar datos de pruebas de interferencia. Al programa de computadora ANALYZE se le hicieron algunas modificaciones con el objeto de tener un buen acoplamiento dentro de la arquitectura propuesta para el sistema experto. Estas modificaciones incluyen:

- Limpieza de memorias a llamados sucesivos a esta rutina.
- Manejo automático de condiciones de error tales como *overflow*, *underflow*, ciclado, etc.

• Inclusión de criterios que le permiten decidir si un determinado disparo (suposición hecha por el usuario), convergirá o no a la solución. Estos criterios hacen que el programa salga rápidamente de los disparos que no lo conduciran a la solución de un problema particular.

El objetivo de esta sección es de describir algunas de las características más importantes de este programa. El modelo de yacimiento considerado en ANALYZE es un medio poroso isotérmico, isotrópico, homogéneo, de espesor constante y extensión infinita. Los pozos se modelan como una línea fuente que penetra completamente el yacimiento. En la figura 4.3 se muestra un esquema del modelo pozo-yacimiento empleado en ANALYZE.

Gasto Variable.

Para manejar gasto variable $q(\tau)$, en ANALYZE se supone que cualquier historia de producción puede representarse de manera adecuada por una secuencia de líneas rectas de inclinación y longitud apropiadas (fig. 4.4). Es decir $q(\tau)$ varia linealmente en el intervalo comprendido entre τ_n y τ_{n+1} , de tal manera que para el segmento de línea n puede escribirse:

$$q(\tau) = A_n + B_n (\tau - \tau_n) \dots\dots\dots(4.1)$$

en donde:

A_n = gasto al inicio del pulso n [L^3T^{-2}]

B_n = la pendiente del pulso de producción [L^3T^{-2}]

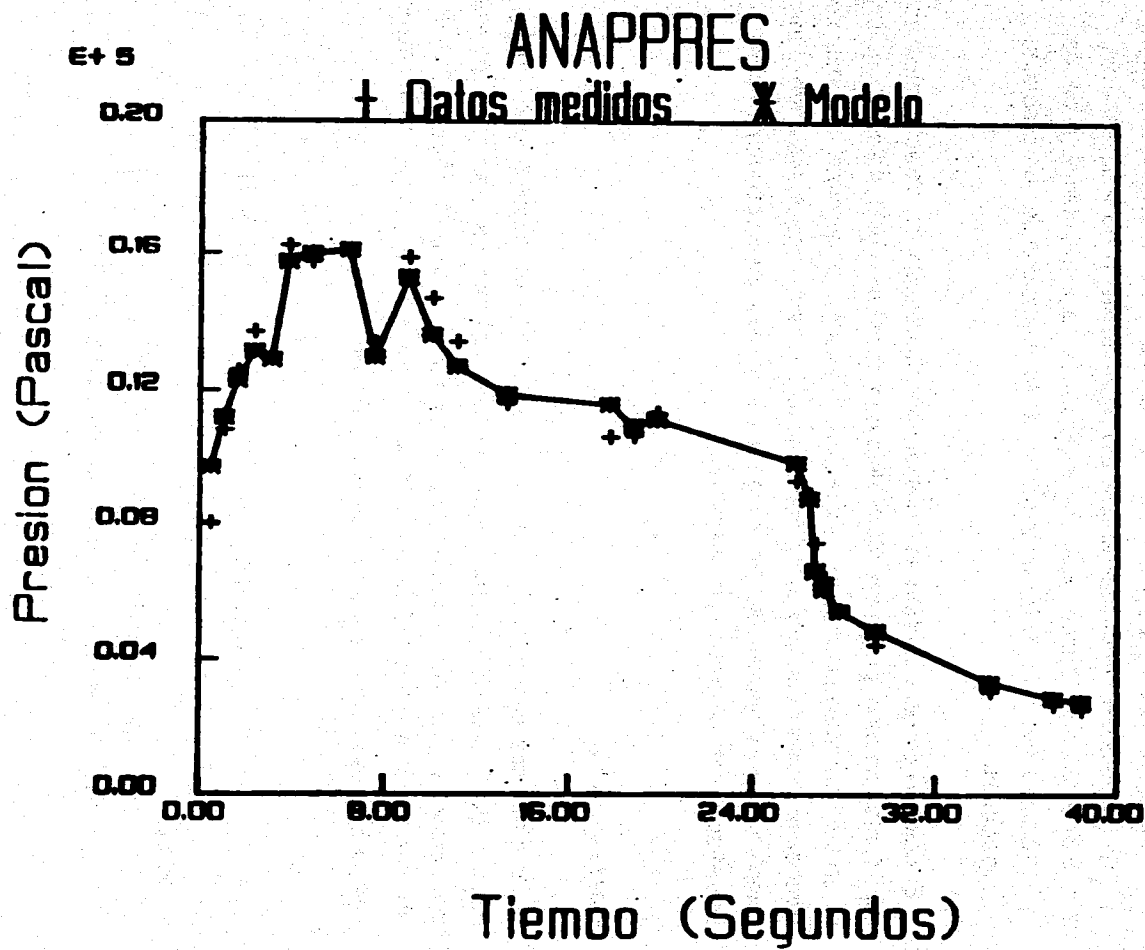


Figura 4.2.- Comparacion grafica de los datos de presión medidos y los calculados. Salida del graficador HP-7665b.

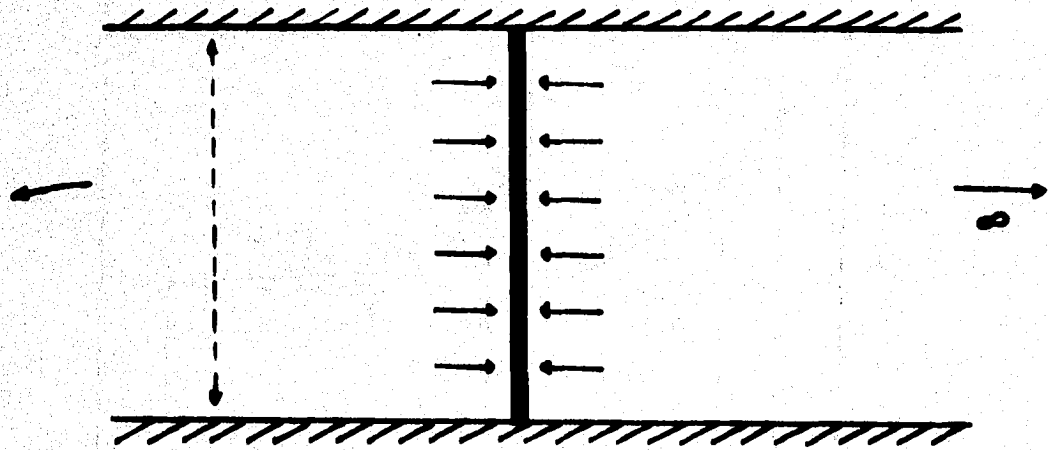


Figura 4.3
ESQUEMA DEL MODELO POZO/YACIMIENTO EMPLEADO
EN ANALYZE

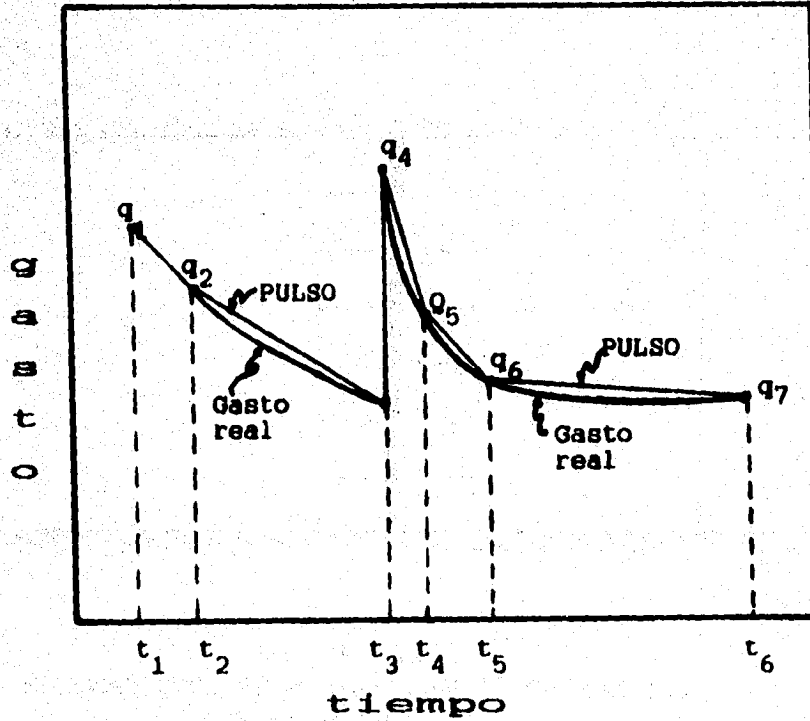


Figura 4.4

El módulo de cálculo ANALIZE maneja gasto y variable suponiendo que cualquier historia de producción puede representarse de manera adecuada por una secuencia de líneas rectas de inclinación y longitud apropiadas.

Cálculo de la Presión.

El decremento de presión $\Delta p(t)$ causada por un gasto variable q_n puede calcularse de la solución al problema de la línea fuente (Carslaw y Jaeger, 1959):

$$\Delta p(t) = \mu/4\pi kh \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} [q(\tau)/t + \tau] \exp [(-r^2)/4\eta (t - \tau)] dt \dots\dots\dots(4.2)$$

En donde:

- η = difusividad hidráulica [L^2T^{-1}],
- μ = viscosidad dinámica [$M^1L^{-1}T^{-1}$],
- h = espesor de la formación [L^1],
- k = permeabilidad [L^2]
- n = número de pulsos de producción,
- r = distancia a un punto de observación [L^1],
- t = tiempo [T^1]

Substituyendo la ecuación 4.1 en 4.2 y evaluando la integral se obtiene:

$$\Delta p_k(r,t) = \mu/4\pi kh \left\{ [A_k + B_k (t - \tau_k)(1+u_k)] (w(u_k) - w(u_{k+1})) - B_k [(t - \tau_k) \exp(-u_k) - (t - \tau_{k+1}) \exp(-u_{k+1})] \right\} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$u_k = (\mu\phi c r^2)/(4k(t - \tau_k))$$

$$u_{k+1} = (\mu\phi c r^2)/(4k(t - \tau_{k+1}))$$

$$w(u) = \int_u^{\infty} [\exp(-y)] / y \, dy$$

La presión al tiempo t se obtiene al sumar las respuestas individuales:

$$\Delta p_{(r,t)} = \sum_{n=1}^N \Delta p_n(r,t) \dots\dots\dots(4.4)$$

En donde n es el número de pulsos de producción antes del tiempo t . Esta es la respuesta de la presión debido a la producción de un pozo. Para estimar la respuesta de la presión en cualquier parte del yacimiento debido a la producción de varios pozos, es necesario usar el principio de superposición (Earlougher, 1977), mediante el cual se obtiene

$$\Delta p_{(r,t)} = \sum_{j=1}^J \Delta p_j(r,t) \dots\dots\dots(4.5)$$

En donde J es el número de pozos de producción/inyección y Δp_j es el decremento causado por la producción del pozo j . El decremento se estima por medio de las ecuaciones 4.3 y 4.4. Las ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5 son la base de todos los cálculos de presión que efectúa ANALYZE.

Mínimos Cuadrados.

ANALYZE determina los parámetros de la formación mediante el procedimiento de minimizar las diferencias entre la presión medida y la presión calculada. El proceso de minimización emplea una rutina de ajuste no lineal de mínimos

cuadrados (Beals, 1966). Con el objeto de tener una medida de la discrepancia existente entre los valores medidos y los calculados se empleó el estadístico *chi-cuadrado* (χ^2) como factor de confianza, el cual se define de la siguiente manera:

$$\chi^2 = 1/I \sum_{i=1}^N \{ [\Delta p_{calc}(i) - \Delta p_{obs}(i)] / \Delta p_{obs}(i) \}^2 \dots\dots\dots (4.6)$$

Como puede observarse la diferencia entre los cambios de presión calculados y los cambios de presión medidos se normaliza a los cambios de presión observados. Esto se hace con objeto de dar igual peso a todos los datos. La suma de las diferencias entre los datos medidos y calculados se promedia sobre el número total de datos empleados en el análisis. Esto permite comparar resultados de análisis con diferentes números de puntos de observación. Cuando se obtiene un mínimo aceptable los valores de presión medidos y observados son muy parecidos. En este momento es razonable suponer que se han obtenido los parámetros correctos del yacimiento.

Cuando hay en el análisis más de un pozo de observación, el programa usa un estadístico el cual incluye los datos de cada pozo de observación:

$$\chi^2 = 1/H \sum_{h=1}^H 1/I \sum_{i=1}^{I(h)} \{ [\Delta p_{calc}(h,i) - \Delta p_{obs}(h,i)] / \Delta p_{obs}(h,i) \}^2 \dots\dots\dots (4.7)$$

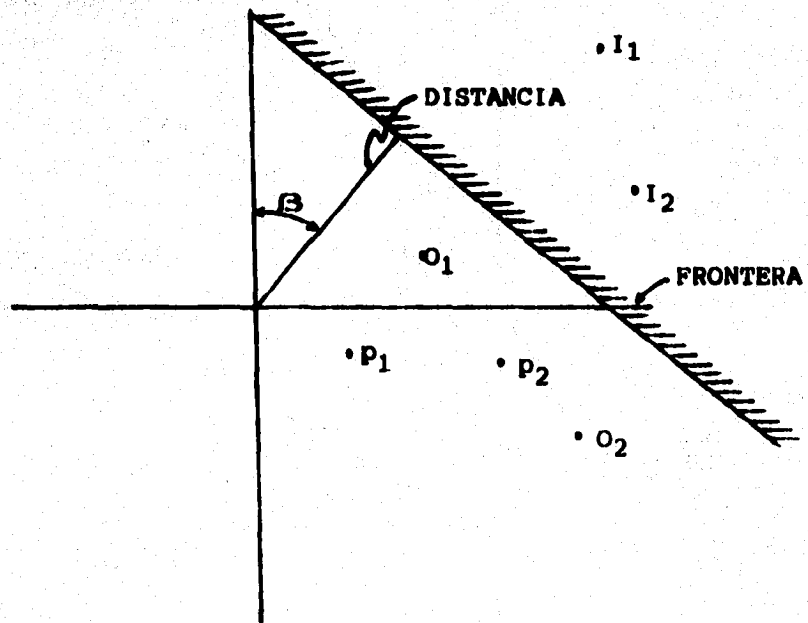
en donde: *H* es el número de pozos de observación.
I, es el número total de datos empleados.

Fronteras Hidrológicas.

ANALYZE puede modelar fronteras hidrológicas por medio del método de imágenes (Hantush, 1964). De acuerdo con este método una frontera puede considerarse como una línea de simetría bilateral, alrededor de la cual los pozos de producción imagen, están arreglados en una correspondencia simétrica uno a uno, con pozos de producción real (fig. 4.4). Para modelar una frontera impermeable, a cada pozo de producción imagen se le asigna un gasto idéntico al de su correspondiente pozo real; el resultado es un gradiente de presión cero, perpendicular a la línea de simetría. Una frontera de presión constante se modela con pozos imagen de producción-inyección con gastos idénticos, pero de signo contrario, a los correspondientes pozos reales; ésto da como resultado que no exista un cambio de presión a lo largo de la línea de simetría, la cual es la condición matemática para una frontera de presión constante de extensión infinita. La localización de las fronteras se especifica en términos de un sistema de coordenadas radial (ángulo y distancia perpendicular al origen del sistema coordenado), cuyo origen corresponde al del sistema coordenado cartesiano que define la localización de los pozos de producción y observación (fig. 4.6). Los pozos imagen que se usan para modelar fronteras contribuyen con una componente adicional a la respuesta de la presión. Esta simplemente se suma a la contribución de los pozos de producción real, de tal manera que la ecuación 4.5 puede escribirse como:

$$\Delta p(h, l) = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \Delta p(h, l, j, n, r, r_{n,j}) \pm \Delta p(h, l, j, n, r', r'_{n,j}) \dots (4.6)$$

la primera parte de esta ecuación corresponde a la contribución de los pozos reales y la segunda parte a la contribución de los pozos imagen. El signo (+) denota una frontera impermeable y el signo (-) indica una frontera de presión constante.



p - POZO DE PRODUCCION
o - POZO DE OBSERVACION
I - POZO IMAGEN

FIG. 4.5- LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS IMAGEN.

Descripción del Sistema Experto ANAPPRES

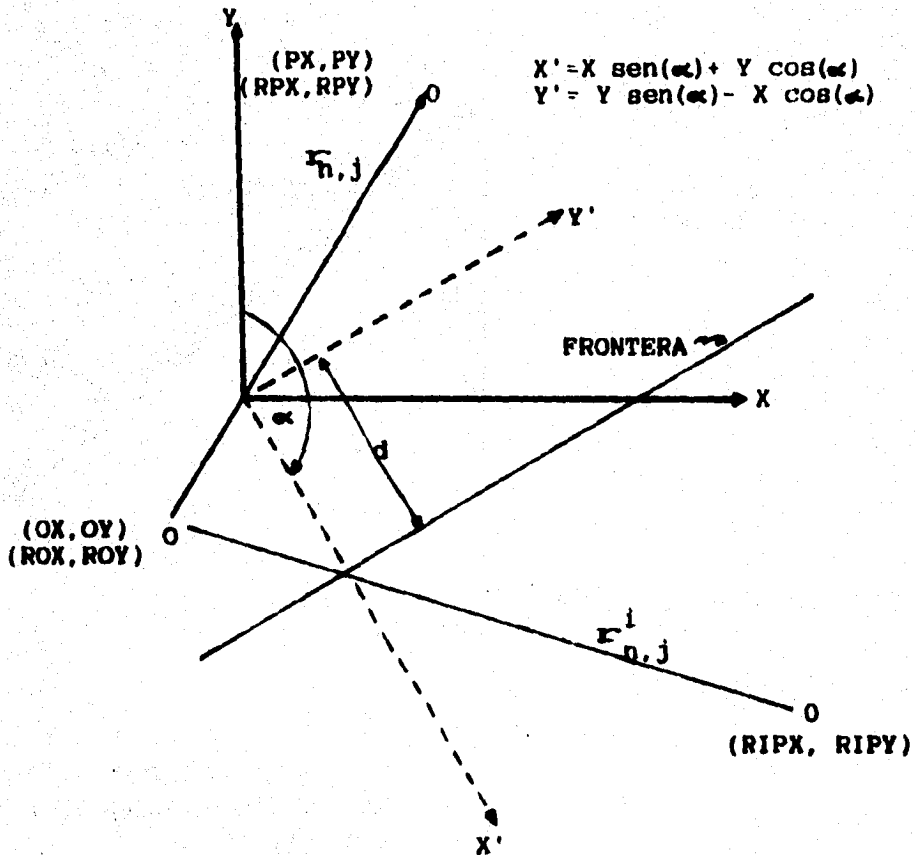


FIG. 4.6.-ESQUEMA PARA EL CÁLCULO DE LA DISTANCIA A LOS POZOS IMAGEN.

IV.4.3 .- Base de Conocimientos.

La estructuración y formalización de la base de datos es normalmente una tarea difícil. En este caso se decidió primeramente representar el conocimiento por medio de diagramas de flujo, en los que el experto humano explica como se toman las decisiones y posteriormente los diagramas de flujo se convirtieron en reglas de producción (Arellano, 1987), con la condición-acción. Un ejemplo de este tipo de reglas es el siguiente:

IF (CONDICION) THEN...

.
. .
. .

ACCIONES

.
. .
. .

END IF

Cuando el argumento IF es válido, puede deducirse el argumento THEN. El sistema experto emplea a la *transmisividad* y al estadístico *chi-cuadrado*, como criterios para la toma de decisiones. Cuando los valores de presión medidos y calculados son muy parecidos ($X^2 < 0.5$), se supone que el modelo del yacimiento empleado en ANALIZE es adecuado para efectuar la interpretación de la prueba. Durante la interpretación de la misma el comportamiento de los valores de *transmisividad* y *chi-cuadrado* le permite al sistema experto diagnosticar la presencia de fronteras hidrológicas y definir el tipo de las mismas.

Este módulo contiene los conocimientos necesarios para realizar el análisis de pruebas de un pozo. Estos conocimientos incluyen; el criterio cuantitativo para

decidir si hay frontera hidrológica y su tipo, qué suposiciones se hicieron al inicio del módulo, etc.

Dentro de la base de conocimientos se integró una tabla que contiene 16 pares de valores de *transmisividad* y *coeficiente de almacenamiento*, así como las correspondientes áreas de convergencia. Esta tabla tiene tres objetivos principales:

- 1.- Proveer al usuario de un disparo (suposición) inicial en caso de que no tenga una idea aproximada de cuál es la solución de su problema;
- 2.- asegurarse de que el módulo de cálculo busca la solución dentro del espacio factible y;
- 3.- dado que los métodos de optimización no lineales generalmente encuentran un óptimo local o relativo, y no existe dentro de la optimización no lineal método alguno que detecte sistemáticamente a todos los mínimos o máximos locales; esta tabla asegurará en este caso particular, que la solución que se encuentra es la mejor, dado que recorre todo el espacio de solución factible.

El espacio de solución factible se determinó en base a los valores extremos típicos de permeabilidad, porosidad, espesor de la formación, viscosidad y compresibilidad que se encuentran en los medios homogéneos saturados con líquido. Los valores de la tabla se obtuvieron del análisis del espacio de solución de 230 pruebas. En la figura 4.7 se presenta el espacio de solución que cubre cada uno de los disparos de la tabla, los cuales se representan por círculos en la figura.

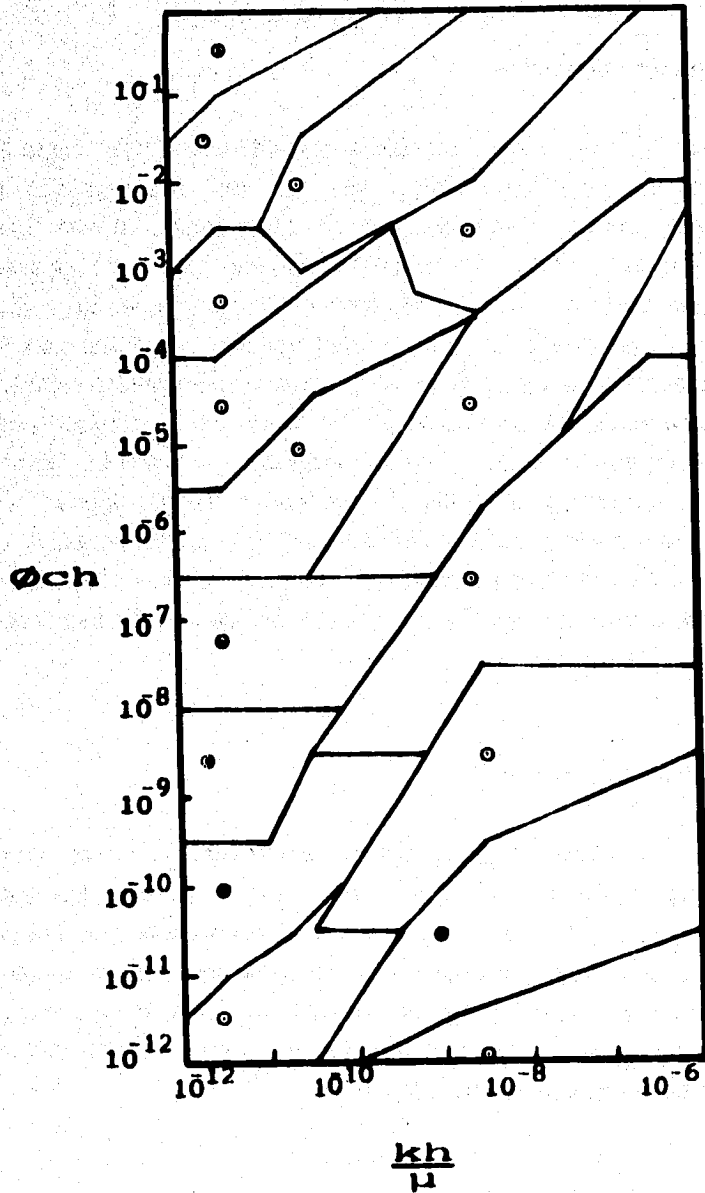


FIG. 4.7.- AQUI SE MUESTRAN LOS 16 PARES DE VALORES DE TRANSMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (CIRCULOS) QUE CONSTITUYEN LA TABLA DE DISPAROS OPTIMOS Y EL ESPACIO DE SOLUCION QUE CUBRE CADA UNO DE ELLOS.

IV.4.4.- Máquina de inferencias.

La máquina de inferencias es el módulo encargado de "decidir" como llevar a cabo el análisis de la prueba, en base a las opciones seleccionadas por el usuario; los resultados del módulo de cálculo y el contenido de la base de conocimientos. La máquina de inferencias inicialmente pone en operación y controla el funcionamiento del módulo de cálculo. Una vez que el módulo de cálculo entrega sus resultados, la máquina de inferencias interactúa con la base de conocimientos con el objeto de llegar a una conclusión. En esta etapa lo que básicamente hace el sistema experto es el proponer una hipótesis y después probarla. Una vez que se llega a algún diagnóstico, ANAPPRES lo presenta en pantalla de la terminal, y el módulo de inferencias prende algunas banderas que le permiten al módulo de explicación soportar las conclusiones. Todas las veces, la máquina de inferencias llega a una conclusión, que los comandos de la interfase hombre-máquina despliegan en la pantalla de la PC y se pregunta si se desea o no de una explicación.

IV.4.5.- Módulo de explicación.

El contenido de las explicaciones están preformateadas para todos los diagnósticos y conclusiones a las que pueda llegar ANAPPRES. Estas explicaciones son complementadas con información proporcionada por la máquina de inferencias, cada una llega a diagnósticos y conclusiones. Si el usuario opta por solicitar una explicación, el módulo pasa a la explicación correspondiente a la interfase hombre-máquina, la cual se despliega en forma directa mediante la función de despliegue en pantalla (fig. 4.1).

IV.4.6.- Procedimiento de Análisis.

El sistema experto efectúa una interpretación completamente automática de una prueba de presión mediante una extensión de los métodos convenciona-

les de análisis de pruebas de interferencia. Por lo tanto, las reglas que se emplean en la interpretación convencional son las que emplea ANAPPRES.

A diferencia de otras técnicas computarizadas de análisis, el sistema experto obtiene los valores finales de los parámetros de la formación en una sola corrida de computadora. Sin embargo, el procedimiento de análisis que emplea el sistema experto (fig. 4.8), se divide internamente en tres pasos principales:

- 1) verificación de interferencia,
- 2) búsqueda de fronteras hidrológicas y
- 3) localización de fronteras hidrológicas.

• **PRIMER PASO (Verificación de Interferencia).** El objetivo de esta etapa del análisis es la de determinar que pozos de producción están interfiriendo con que pozos de observación. Para un pozo de observación determinado el sistema experto efectúa secuencialmente tantos análisis como pozos de producción participan en la prueba. En el primer análisis, únicamente se considera un pozo de producción, en el segundo dos, etcétera; si conforme se incrementan los pozos de producción en el análisis, se reducen los valores de X^2 , se considera que esos pozos interfieren con el pozo de observación. Si esto no ocurre se considera que esos pozos de producción, no interfieren con ese pozo de observación en particular y se elimina de su análisis. Como parte de los resultados de esta etapa se obtiene una estimación de la *transmisividad* y del *coeficiente de almacenamiento*.

• **SEGUNDO PASO (Búsqueda de fronteras hidrológicas).** Esta etapa del análisis persigue los siguientes objetivos:

- 1) Determinar si existe una frontera y en caso de que así sea definir el tipo de frontera y obtener una estimación de la *transmisividad* (kh/μ) y del *coeficiente de almacenamiento* (ϕch).

2) Si se determina que no existe frontera se obtienen los valores finales de (kh/μ) y (ϕch) .

En esta etapa, el sistema experto efectúa secuencialmente tres análisis de los datos en búsqueda de los dos parámetros. En el primer análisis únicamente se considera la cuarta parte más temprana de los datos, en el segundo la primera mitad de los datos y en el tercero se consideran todos los datos de la prueba. Si a medida que se incrementan los datos más tardíos de la prueba, los valores de transmisividad se hacen progresivamente mayores (o menores), coincidentemente con un aumento progresivo de los valores de X^2 , se diagnostica la presencia de una frontera hidrológica del tipo barrera (presión constante).

Si los valores de transmisividad y de X^2 no cambian apreciablemente, (cambios menores al 5% y 15% respectivamente), se diagnostica que los datos no contienen información de fronteras y se aceptan los valores calculados de transmisividad y coeficiente de almacenamiento terminándose el análisis para este pozo.

Si se diagnostica la existencia de una frontera, los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento calculados con una cuarta parte de los datos, se usan como sospechas iniciales para trabajar en el tercer paso de análisis.

• **TERCER PASO (Localización de fronteras hidrológicas).** El objetivo de esta etapa del análisis es el de determinar simultáneamente los valores de transmisividad, coeficiente de almacenamiento y, ángulo y distancia a la frontera. En una primera etapa el sistema experto trabaja con el pozo productor y con cada uno de los pozos de observación. Cuando sólo se dispone de datos de un pozo productor y de un pozo de observación, la localización de la frontera no puede determinarse de manera única; por lo que en este caso el sistema experto fija el ángulo y lleva a cabo un análisis de tres parámetros (transmisividad, coeficiente de almacenamiento y distancia a la frontera). Una vez determinados estos parámetros para todos los pozos que intervienen en la prueba, ANAPPRES

Descripción del Sistema Experto ANAPPRES

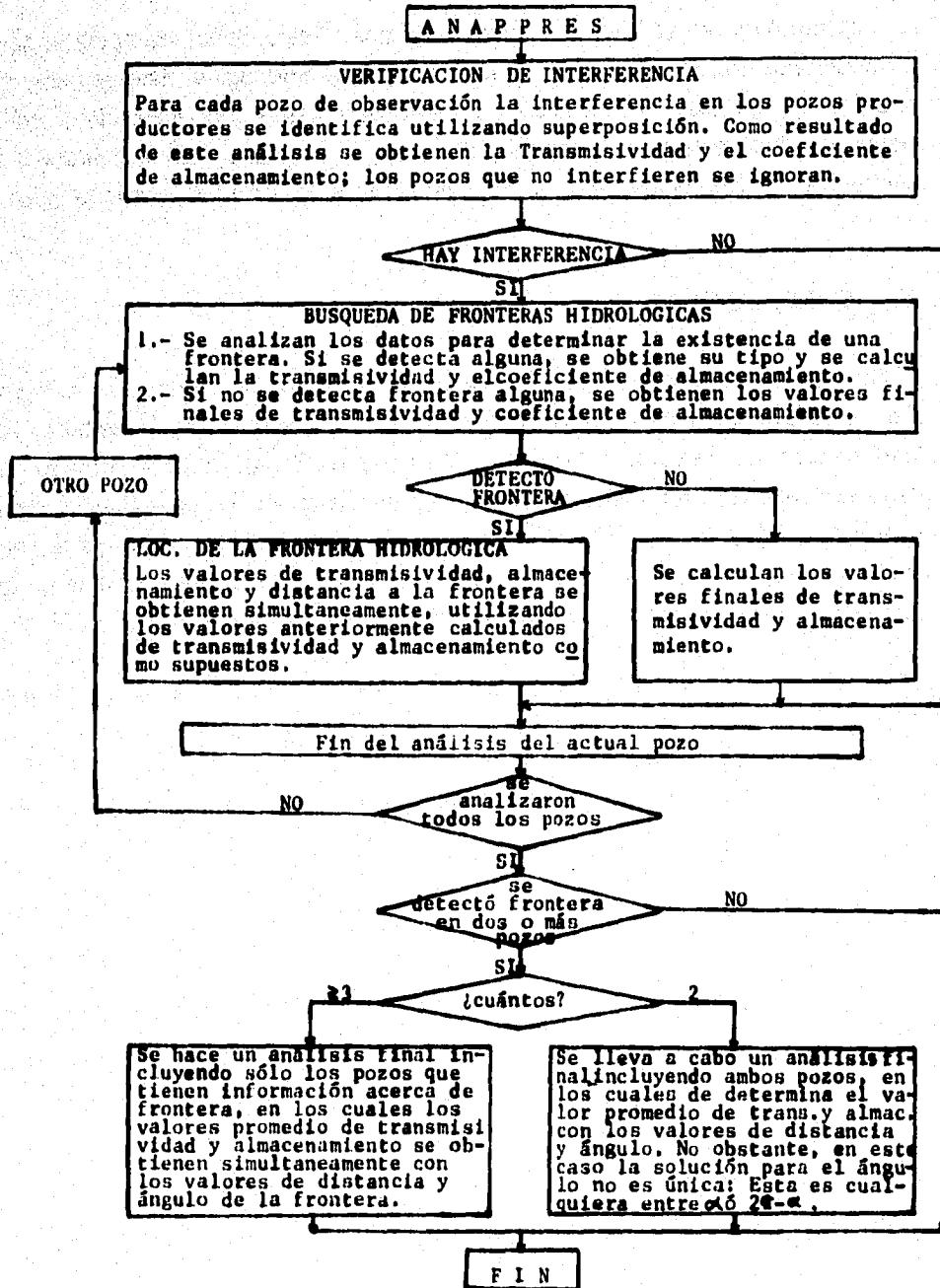


FIG. 4.8.- DIAGRAMA DE FLUJO DEL ANALISIS QUE LLEVA A CABO ANAPPRES

estructura un nuevo archivo de datos, en base a los archivos de datos originales de los pozos que detectaron la misma frontera hidrológica. Esto se hace con el objeto de efectuar un análisis de cuatro parámetros (transmisividad, coeficiente de almacenamiento, ángulo y distancia a la frontera). En la figura 4.8 se encuentra ilustrado el diagrama de flujo del análisis desarrollado por ANAPPRES.

IV.5.- CONCLUSIONES.

Se ha descrito brevemente en este capítulo, las bases principales sobre la arquitectura del sistema experto ANAPPRES, con lo que el lector puede tener una idea aproximada de cómo están estructurados los SE en general, a fin de que lleguen a resolver problemas de las áreas para las cuales se proyectan. Aunque el tema es muy amplio, la idea es despertar el interés en quienes deseen explorar este campo, a fin de que se construyan más y mejores sistemas en los que expertos en una determinada área, integren sus conocimientos.

CAPITULO V

APLICACION DE ANAPPRES AL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION.

V.1.- INTRODUCCION.

Con el objeto de validar los resultados y diagnósticos del sistema experto, en este capítulo se analizaron tres problemas cuya soluciones se conocían. En el primero de ellos se analizan los datos de una prueba de interferencia en la que participan nueve pozos petroleros, uno de inyección y ocho de observación, primeramente se presenta la solución que se obtuvo utilizando la técnica de curva tipo y posteriormente la que se obtuvo con el SE. En el segundo se analiza una prueba en la que participan cinco pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto y en el tercero, se comparan los resultados y diagnóstico del SE con la curva de Theis; ésta es la solución adimensional a la inyección o producción a gasto constante, de una línea fuente la cual penetra completamente un medio poroso arealmente infinito isotrópico, isotérmico y de espesor constante.

V.2.- PRUEBA DE INTERFERENCIA EN UN CAMPO PETROLERO₁₂.

En un campo petrolero se efectuó una prueba de inyección con el objetivo de determinar si existían direcciones preferenciales de permeabilidad. La prueba de inyección se seleccionó porque las producciones eran muy bajas, causando decrementos de presión. En la figura 5.1 se presenta la localización de los pozos que participaron en la prueba, los números dentro de los paréntesis designan las coordenadas de cada pozo con respecto al pozo inyector el cual se tomo como origen en el sistema.

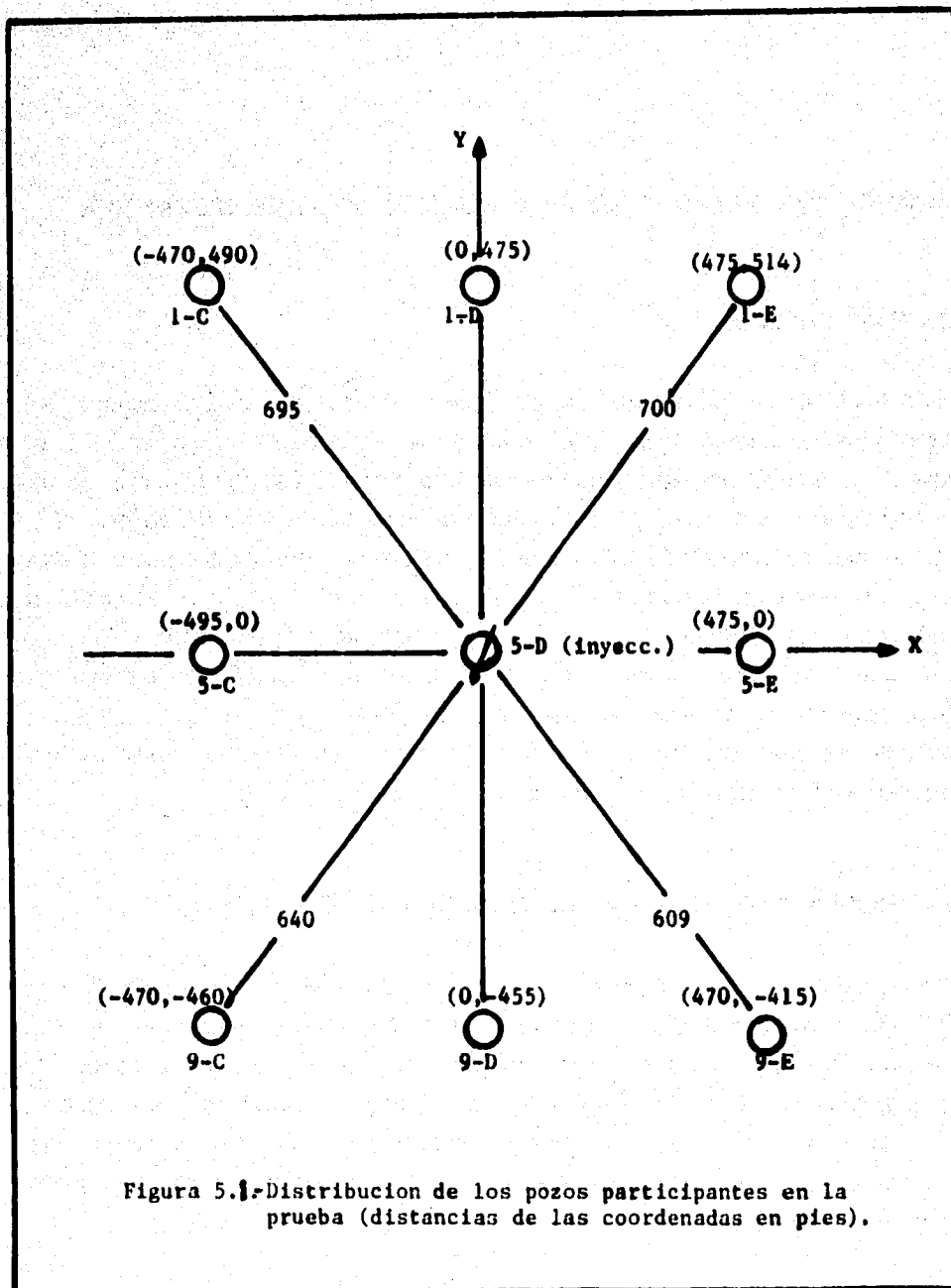


Figura 5.1.- Distribución de los pozos participantes en la prueba (distancias de las coordenadas en pies).

Tabla 5.1
Datos de los pozos participantes en la prueba.

Pozo 1-C		Pozo 1-D		Pozo 1-E		Pozo 5-C	
t(hr)	$\Delta p(\text{psi})$	t(hr)	$\Delta p(\text{psi})$	t(hr)	$\Delta p(\text{psi})$	t(hr)	$\Delta p(\text{psi})$
		23.5	6.7	27.5	3	47	10
		28.5	7.2	47	5	71	17.2
		51	15	72	11	94	24
		77	20	95	13	113	25.1
		119	24	125	16	146	24
113	22	125	23.2	142	13	192	17
125	22	141	19	192	10	210	15
146	19	163	18	215	10	240	15.2
195	16	188	14	240	6	260	14
215	14	215	12	295	5.8	285	13
249	14	265	10				
295	11	290	10				

Pozo 5-C		Pozo 9-C		Pozo 9-D		Pozo 9-E	
t(hr)	$\Delta p(\text{psi})$	t(hr)	$\Delta p(\text{psi})$	t(hr)	$\Delta p(\text{psi})$	t(hr)	$\Delta p(\text{psi})$
21	4	24	4	23.5	8.2	21	3
47	11	47	8	28.5	9.3	47	3
72	16.3	72	13	51	17	71	3
94	21.2	94	17.7	75	23.2	94	10
115	22	115	18	95	27.2	115	12.5
122	25	126	18	120	27	125	13
140	22.3	145	17	143	21	143	12.8
188	19.2	194	11	190	16	195	13
210	18	215	13	215	14	215	13
285	15	245	11	270	13	240	10

Aplicación de ANAPPRES al análisis de pruebas de presión

La prueba se llevo a cabo inyectando 115 bl/día de agua, durante 101 horas en el pozo central, pozo 5-D, y observandose el comportamiento de la presión en los ocho pozos que lo rodean. A continuación se presentan los datos del yacimiento y en la tabla 5.1 se enlistan los datos de tiempo y presión medidos en los pozos de observación.

Datos del yacimiento.

$$\phi = 0.20 \quad B_w = 1 \text{ bl/stb}$$

$$h = 25 \text{ pie} \quad \text{API} = 36 @ 60^\circ/80^\circ$$

$$p_i = 240 \text{ psi} \quad \mu_w = 1 \text{ cp}$$

$r_w = 0.563 \text{ pie}$ promedio, empacador de fondo abierto.

Datos del pozo de inyección:

Profundidad total = 1011 pie, terminado con tubería de 2 pg d_i .

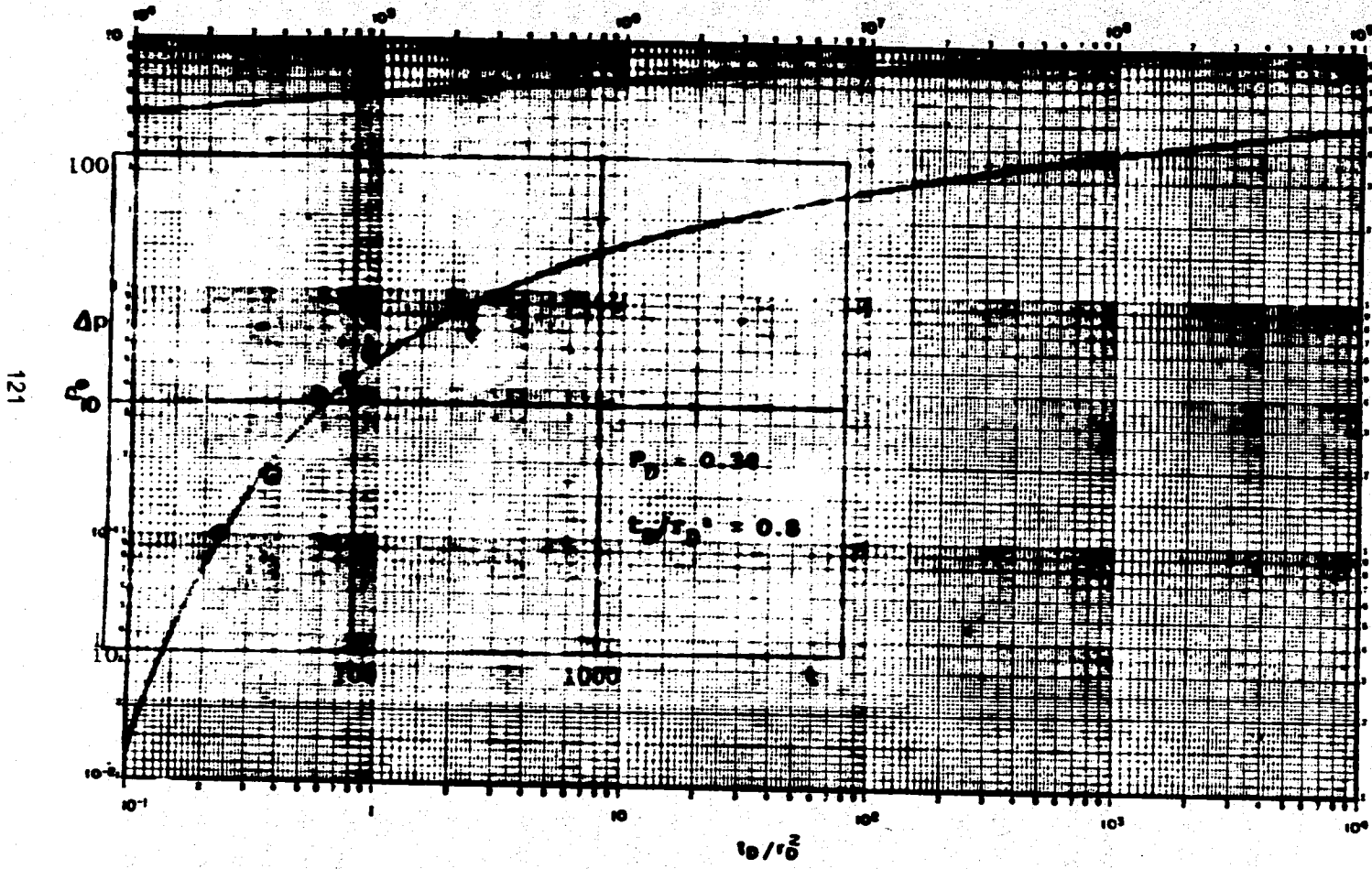
$q_w = 0.563 \text{ pie}$ promedio, empacador de fondo abierto.

Solución:

Para el pozo 1-D: $r = 475 \text{ pie}$, $\Delta p = 10 \text{ psi}$ y $t = 100$
con los datos anteriores se realiza un ajuste con curva tipo, empleando la figura 2.11, con lo cual se obtienen los valores de: $P_D = 0.26$ y $t_D/r_D^2 = 1.3$ (el ajuste para este pozo se muestra en la figura 5.2 a).

sustituyendo estos últimos valores en la ecuación (2.11):

$$kh/\mu = (141.2) (115) (1.0) (0.26) / (10) = 422.88 \text{ [md pie/cp]}$$



121

FIG. 5.2 a) AJUSTE PARA EL POZO 1-B

FALLA DE ORIGEN

sustituyendo el valor anterior en la ecuación (2.12):

$$\phi c_1 h = [(0.0002637) (100)] / [(1.3) (475)^2] (422.88) = 3.7956 \text{ [pie/psi]}$$

transformando a unidades del S. I. para ser consistentes con ANAPPRES, se obtienen:

$$k h / \mu = 1.27E-10 \text{ [m}^3 \text{ / Pa seg]}$$

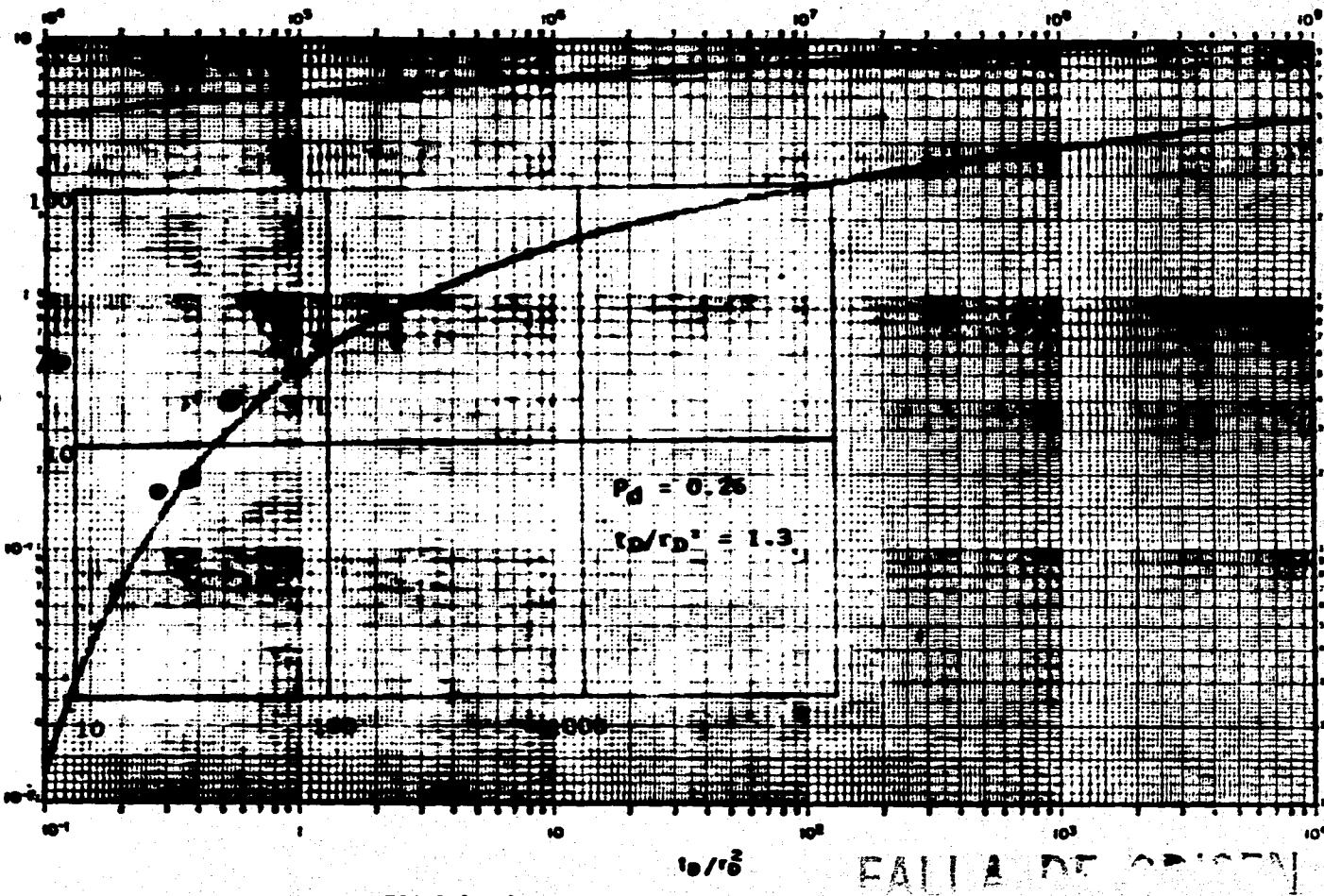
$$\phi c_1 h = 1.68E-09 \text{ [m/Pa]}$$

Procediendo de igual forma con los pozos restantes se obtienen los resultados mostrados en la tabla 5.2; los ajustes mediante los que se determinaron los valores de P_D y t_D/r_D^2 se pueden observar en las figuras 5.2b a 5.2g.

El SE actúa de la siguiente manera: A partir del menú principal (figura 5.3a), el usuario puede seleccionar cualquiera de las opciones de los tipos de pruebas que se presentan, -para este ejemplo se eligió la opción "Un pozo activo-N pozos de observación"- posteriormente, el sistema solicita los nombres de los archivos (previamente grabados), que contienen los datos, tanto del pozo activo como de los de observación. ANAPPRES efectúa el análisis de la información contenida en dichos archivos presentando varias pantallas; entre ellas se presenta gráficamente la localización de los pozos que participan en la prueba, el comportamiento de los gastos en los pozos de producción vs tiempo y de la presión en todos los pozos vs tiempo. A continuación se solicita información tal como, tiempo de duración de la prueba coorespondiente al primer pozo, y se da la posibilidad de que, el usuario proporcione el disparo inicial, -en caso de que el usuario tenga una idea aproximada- o bien, que el sistema utilice la base de conocimientos. Hecho lo anterior, se efectúa el análisis del primer pozo y se determinan los parámetros kh/μ y ϕch , además de una gráfica comparativa de datos medidos-modelo. De manera sucesiva se analizan cada uno de los pozos restantes y finalmente se presenta el resumen de los resultados obtenidos, figura 5.3b.

FALLA DE ORIGEN FALLA DE ORIGEN

122



Aplicación de ANAPPRES al análisis de pruebas de presión

FIG 5.2 b) AJUSTE PARA EL POZO 1-D

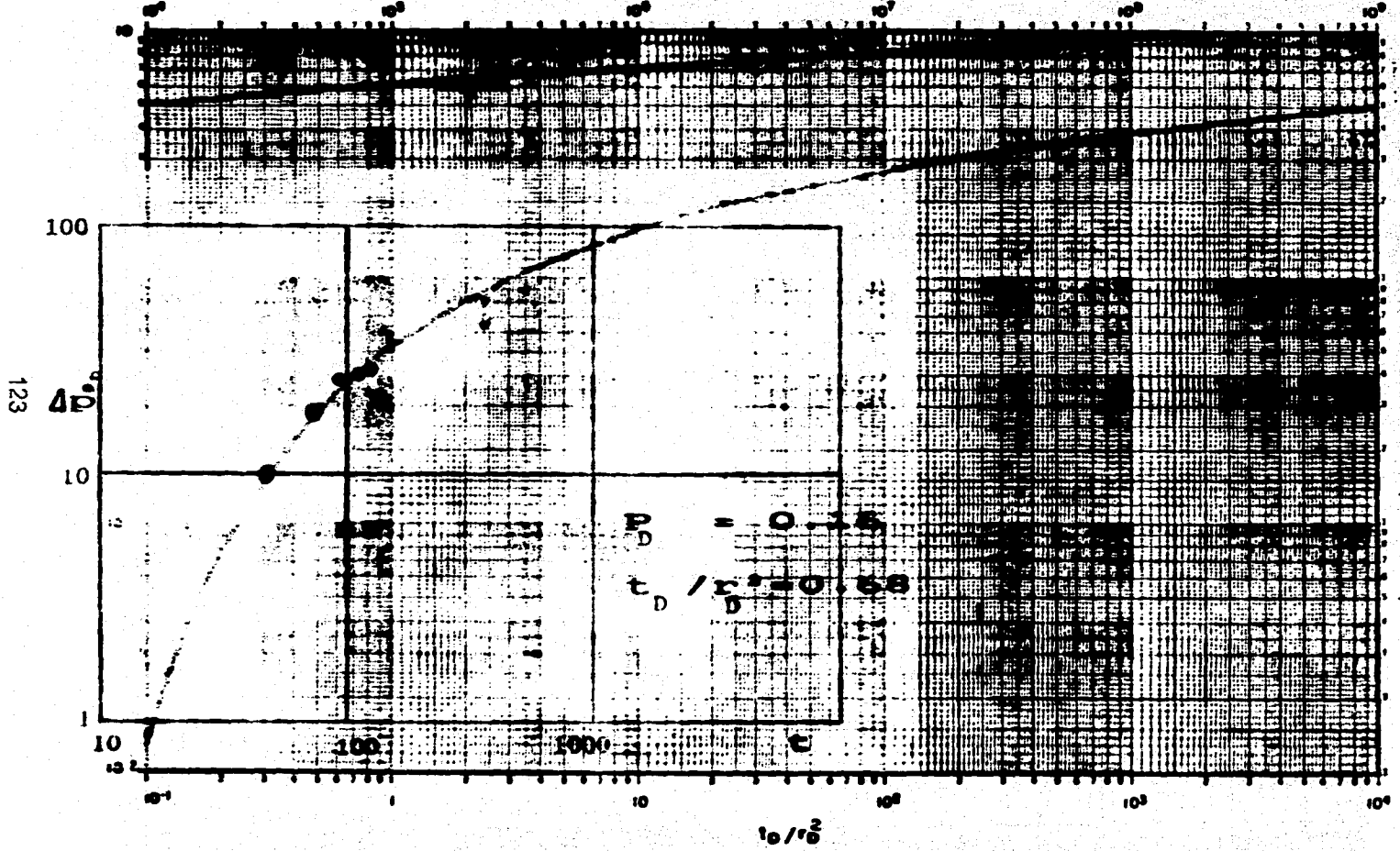
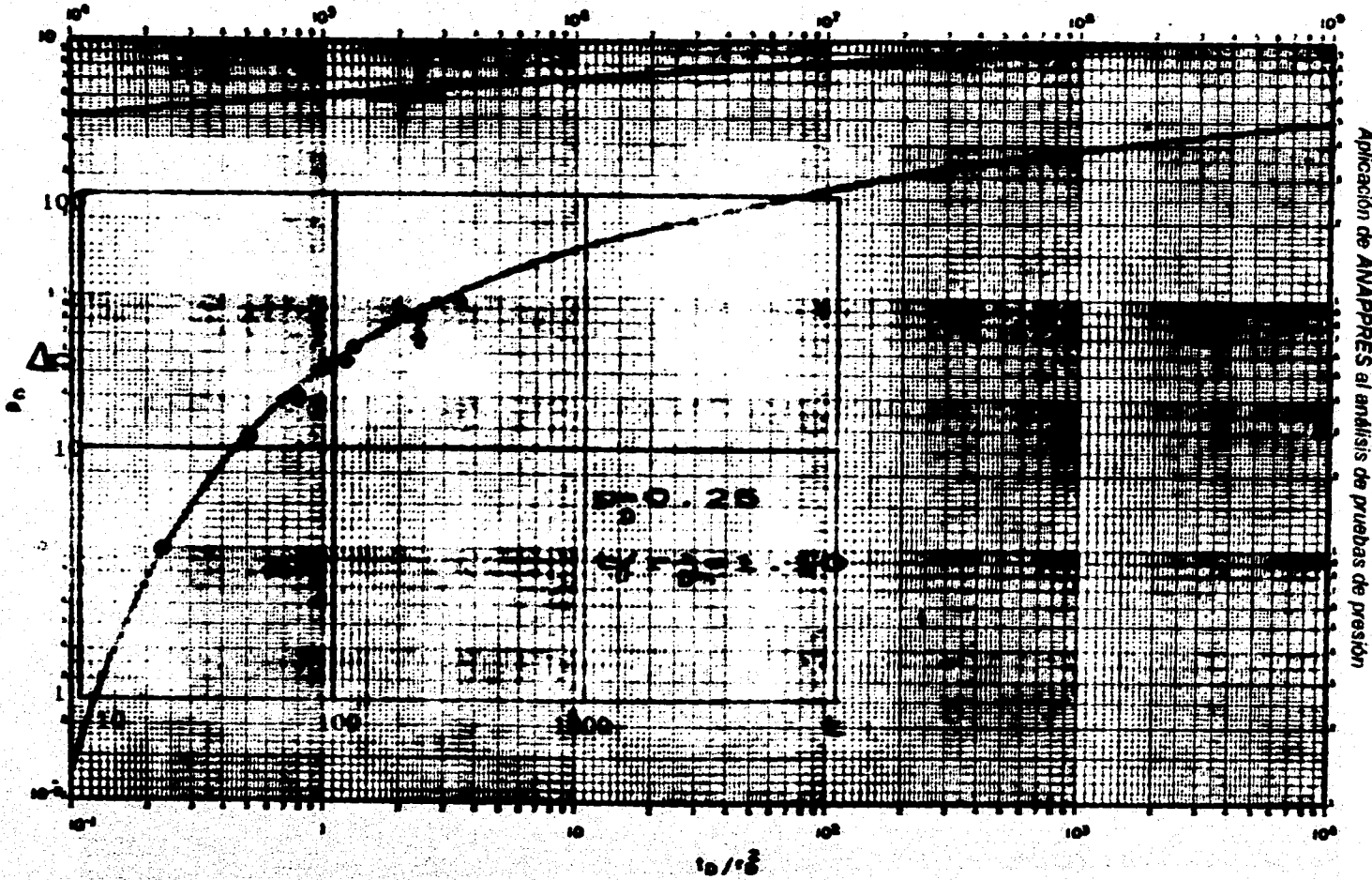


FIG. 5.2 c) AJUSTE PARA EL POZO 5-C

FALLA DE ORIGEN

FALLA DE ORIGEN



Aplicación de ANAPPRES al análisis de pruebas de presión

FIG. 5.2 d) AJUSTE PARA EL POZO 5-E

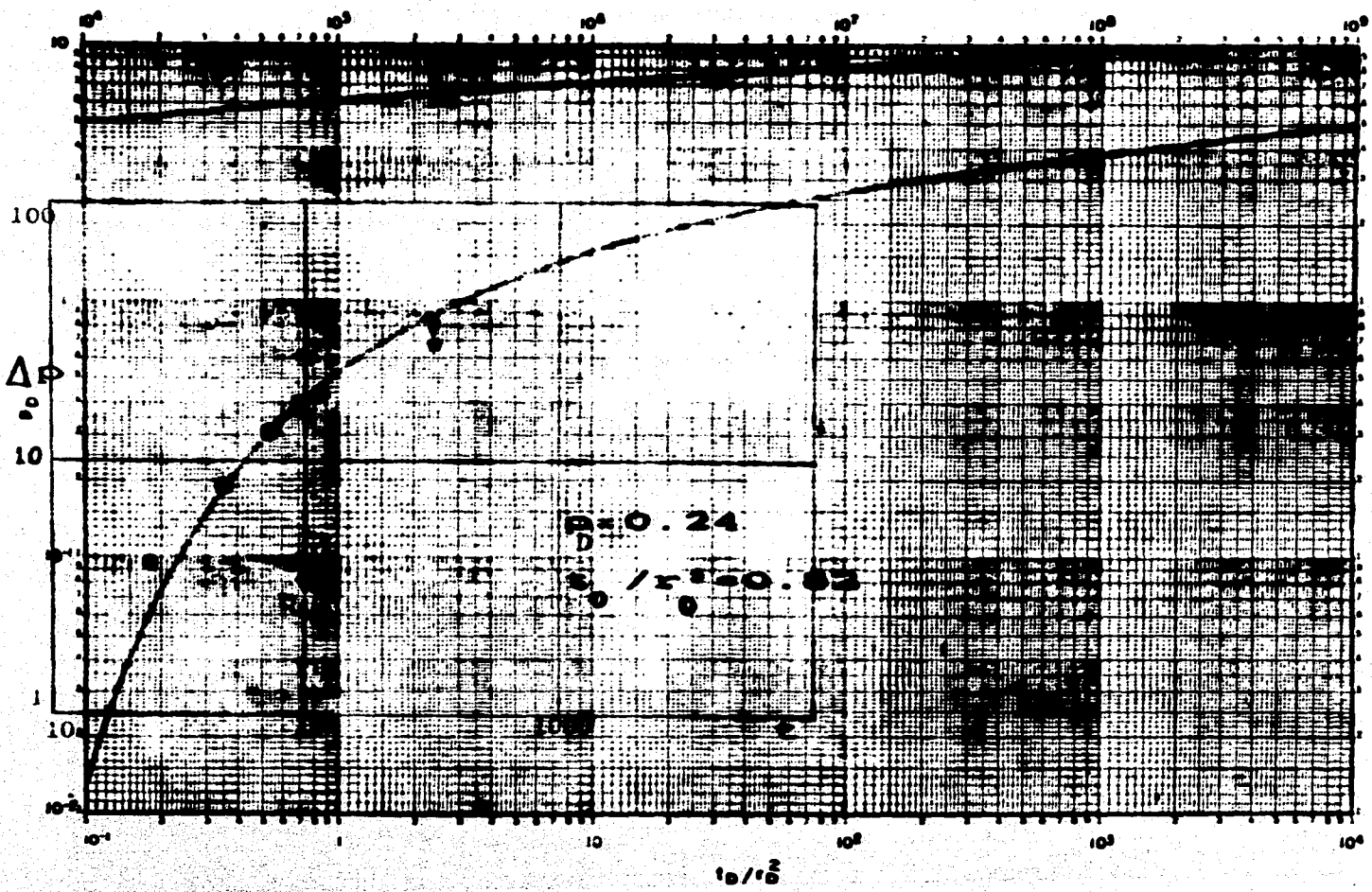


FIG. 5.2 e) AJUSTE PARA EL POZO 9-C

FALLA DE ORIGEN

FALLA DE ORIGEN

126

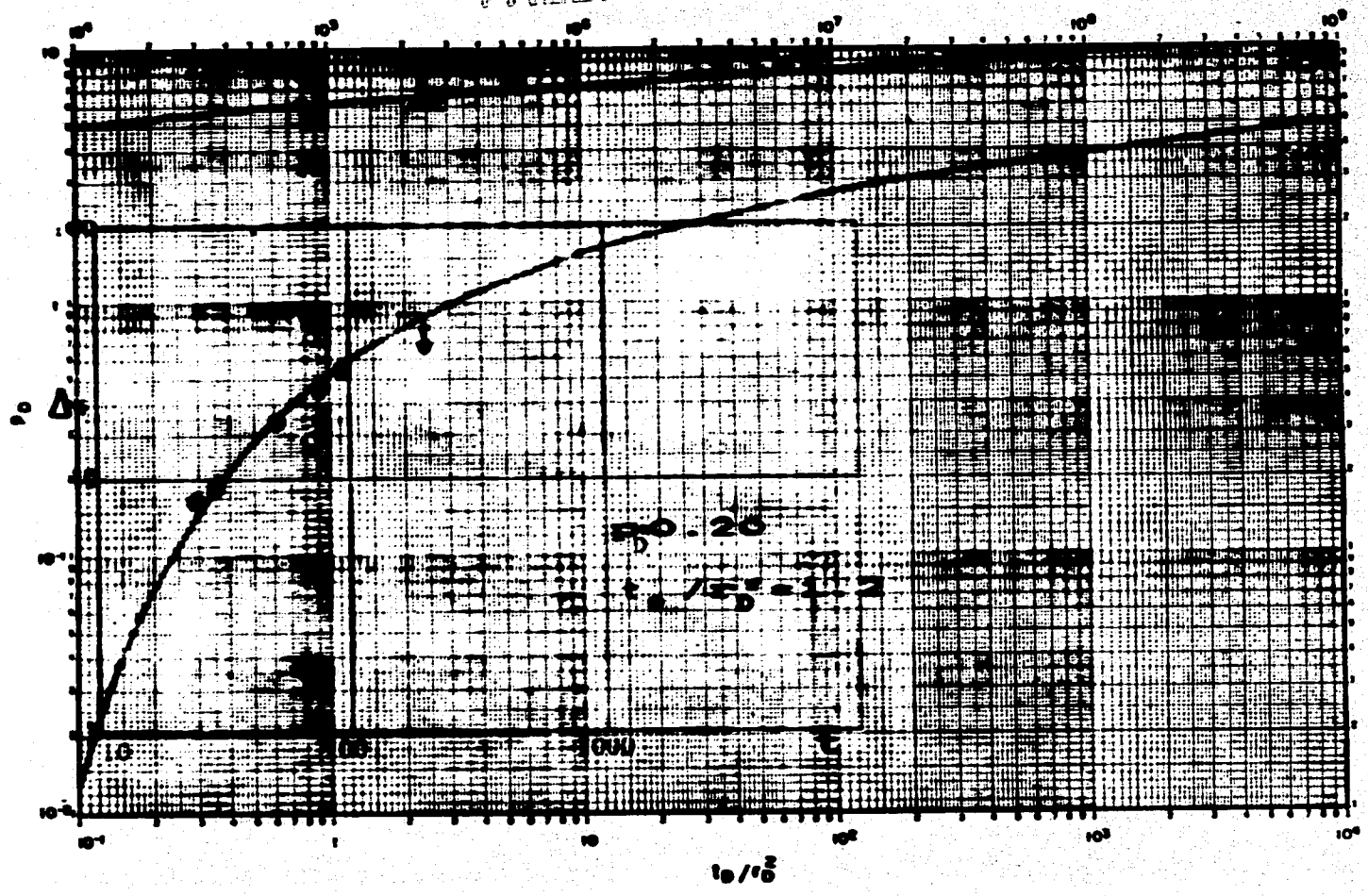
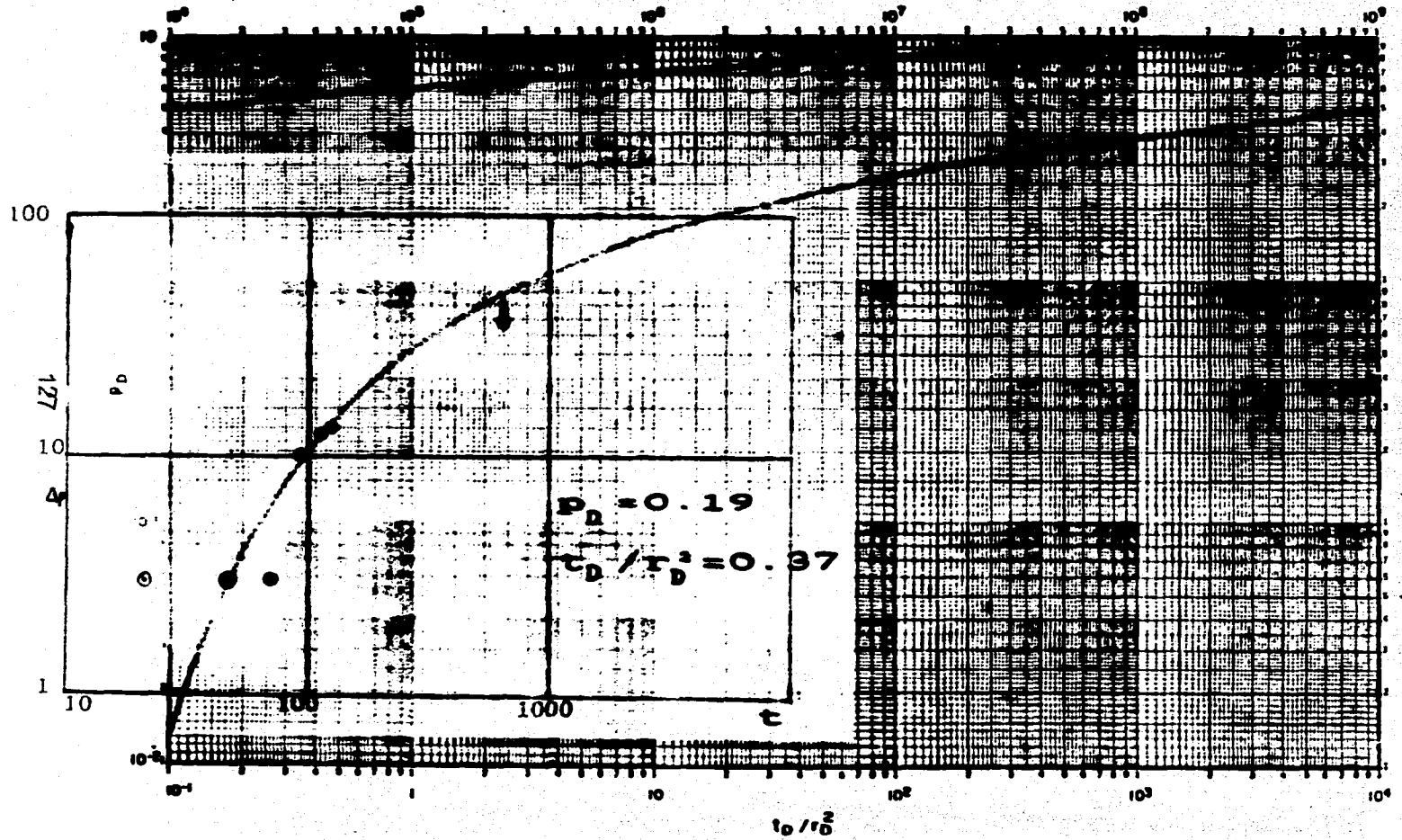


FIG. 5.2 f) AJUSTE PARA EL POZO 9-D

FALLA DE ORIGEN



Aplicación de ANAPPRES al análisis de pruebas de presión

FIG. 5.2 g) AJUSTE PARA EL POZO 9-E

Aplicación de ANAPPRES al análisis de pruebas de presión

Tabla 6.2
Resultados

Pozo	P_0	t_0/r_0^2	Calculados		ANAPPRES		Dif. relativa	
			kh/μ ($\times 10^{-12}$)	ϕch ($\times 10^{-2}$)	kh/μ ($\times 10^{-12}$)	ϕch ($\times 10^{-2}$)	kh/μ %	ϕch %
1-C	--	--	--	--	9.48	1.84	--	--
1-D	0.26	1.33	1.27	1.68	1.12	1.50	11.8	8.5
1-E	0.34	0.8	1.66	1.64	1.51	1.54	9.0	6.1
5-C	0.16	0.68	0.781	2.15	0.749	2.11	4.1	1.9
5-E	0.25	1.10	1.22	1.91	1.19	1.88	7.4	1.6
9-C	0.24	0.82	1.17	1.35	1.13	1.24	3.41	8.2
9-D	0.20	1.20	0.976	1.52	0.973	1.46	0.31	3.9
9-E	0.19	0.37	0.93	2.62	--	--	--	--

$kh/\mu = [m^2 Pa^{-1} s^{-1}]$

$\phi ch = [Pa^{-1} m]$

Diferencia relativa en %

ANAPPRES

SISTEMA EXPERTO PARA EL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION

¿ QUE TIPO DE PRUEBA DESEA REALIZAR?

- + UN POZO ACTIVO - N POZOS DE OBSERVACION**
- + N POZOS ACTIVOS - N POZOS DE OBSERVACION**
- + CAPTURA AMIGABLE DE DATOS**
- + FIN**

ELIJA CON LA FLECHA Y SELECCIONE CON [RETURN]

Figura 5.3 a).- Menú principal que presenta ANAPPRES en una sesión.

ANAPPRES			
SISTEMA EXPERTO PARA EL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION			
UN POZO ACTIVO Y OCHO POZOS DE OBSERVACION			
POZO	kh/μ	ϕ_{ch}	x²
1-C	9.4646E-11	1.8429E-9	2.0307E-2
1-D	1.1220E-10	1.4973E-9	8.1905E-3
1-E	1.5055E-10	1.5361E-9	1.5565E-3
5-C	7.4896E-11	2.1146E-9	2.9773E-3
5-E	1.1947E-10	2.0017E-9	1.3587E-3
9-C	1.1268E-10	1.8826E-9	2.0419E-9
9-D	9.7260E-11	1.4637E-9	1.1078E-2
[RETURN]			

Figura 5.3 b).- Valores de los parámetros obtenidos por el sistema.

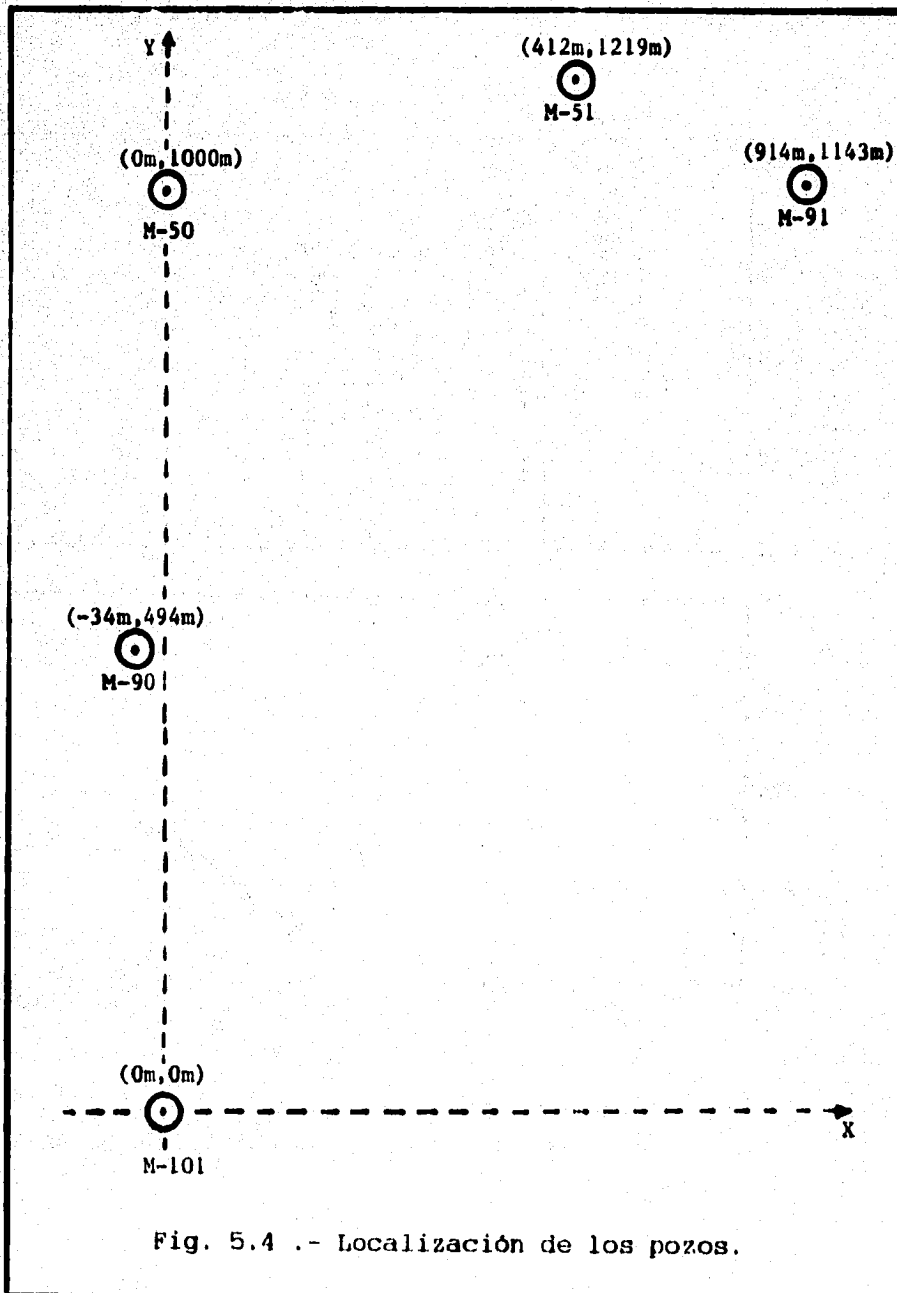
V.3.- PRUEBA DE INTERFERENCIA EN UN CAMPO GEOTERMICO₂.

Para este ejemplo se escogió una prueba de interferencia llevada a cabo en el campo geotérmico de Cerro Prieto en el Estado de Baja California Norte, México, el cual está siendo utilizado actualmente para generar energía eléctrica. El yacimiento es un depósito de roca sedimentaria y arenisca, arcillas y esquistos. El espesor total del yacimiento no se conoce en forma precisa, pero en su parte central se estima que es de por lo menos de 1000 m de espesor. La profundidad de los pozos probados esta entre 2000 y 3000 m, y tiene intervalos abiertos de 100 a 200 metros.

Esta prueba de interferencia se llevo a cabo en cuatro pozos activos cada uno con gastos altamente variables los cuales estan siendo desarrollados por primera vez. Por esta razon, fueron gradualmente aumentando a un gasto máximo, el cual se mantuvo constante por varios días, y entonces se bajo a más lento. Los datos fueron obtenidos a una alta temperatura, una sola fase, liquido dominante. La localización de los pozos se presenta en la figura 5.4. El gasto de cada pozo y la respuesta de la presión en los pozos de observacion se muestra en la figura 5.5 A y B.

El ajuste, aunque no es perfecto, es muy aceptable. El procedimiento que siguió ANAPPRES durante esta sesión se describe a continuacion:

En el menú principal, se selecciona el tipo de prueba y se escriben los nombres de los archivos que contienen los datos de los pozos activos y de observación, entonces ANAPPRES inicia el análisis de la información contenida en los archivos presentando varias pantallas para ello, entre las que se presenta la localización de los pozos participantes en la prueba, los gastos de los pozos de producción y el comportamiento de la presión en el pozo de observación, se presenta la información relacionada con los pozos que interfieren con el pozo de observación. Esto se efectúa secuencialmente en varias pantallas, cada una muestra el efecto de adicionar un pozo activo más a la superposición. Eventualmente todos los pozos activos seran considerados y se tendrá un diagnóstico acerca de cuáles de



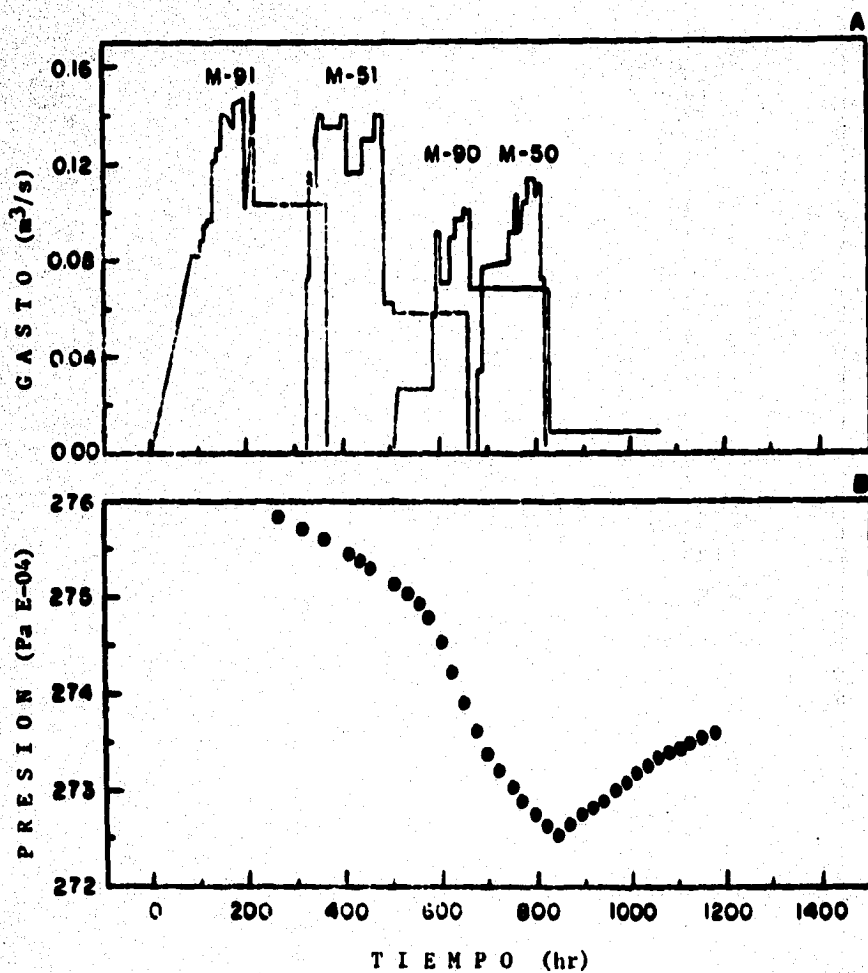


FIG. 5.5 .- A: COMPORTAMIENTO DEL GASTO EN LOS POZOS ACTIVOS.
B: RESPUESTA DE LA PRESION EN EL POZO DE OBSERVACION.

Aplicación de ANAPPRES al análisis de pruebas de presión

ellos interfieren con el pozo de observación. La pantalla final de ésta etapa mostrará la historia de todos los ajustes que han de llevar al diagnóstico (figura 5.6a). En ésta punto el usuario puede preguntar cómo se ha llegado a ese diagnóstico; si lo desea se le presentará una explicación (figura 5.6b).

A continuación ANAPPRES trata de definir si los datos indican la existencia de una frontera. Esta búsqueda se basa en la consideración de que los efectos de frontera son más notables en los datos de presión más tardíos, los cuales pueden apartarse significativamente de la solución del yacimiento infinito. En esta caso particular los ajustes a los datos tempranos y tardíos no difieren significativamente, indicando que los datos no contienen información de frontera. Esta conclusión se presenta en la siguiente pantalla (figura 5.6c). Posteriormente si el usuario lo desea se presenta una gráfica con el ajuste final de los datos (figura 5.6d). La pantalla final de éste análisis nos muestra un resumen de los resultados (figura 5.6e).

ANAPPRES			
SISTEMA EXPERTO PARA EL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION			
N-POZO ACTIVOS-N POZOS DE OBSERVACION PARA EL POZO DE OBSERVACION M-101 SE ENCONTRO QUE LOS SIGUIENTES POZOS INTERFIEREN: M-91, M-51, M-90 y M-50			
HISTORIA DE LOS AJUSTES SUCESIVOS			
POZO OBS.	kh/μ	ϕ_{gh}	X²
1	4.1368E-8	2.3813E-7	4.9600E-2
2	1.2331E-7	4.9813E-7	2.7778E-2
3	3.4701E-7	9.6892E-7	2.3636E-3
4	4.1516E-7	1.0248E-6	1.4337E-3
Explicacion (s/n)? > S		[RETURN]	

Figura 5. 6 a).- Presentación de las conclusiones obtenidas después de valorar la interferencia de cada uno de los pozos.

ANAPPRES	
SISTEMA EXPERTO PARA EL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION	
N POZOS ACTIVOS-N POZOS DE OBSERVACION	EXPLICACION
	<p>Para el pozo de observación M-101:</p> <ul style="list-style-type: none">+ Cuatro pozos activos se incluyeron en la solución de la superposición. La calidad del ajuste se midió por el estadístico "CHI-CUADRADO".+ Pozos excluidos de la solución: CERO; debido a que no mejora la calidad del ajuste en la posición observada.+ El valor de CHI-CUADRADO correspondiente a la solución es consistente con la tolerancia.+Por lo tanto se concluye que los pozos que interfieren son: M-91, M-51, M-90 y M-50. <p>[RETURN]</p>

Figura 5.6 b).- Ejemplo de la explicación que dá el sistema.

ANAPPRES

SISTEMA EXPERTO PARA EL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION

N- POZOS ACTIVOS- N POZOS DE OBSERVACION

BUSQUEDA DE FRONTERAS HIDROLOGICAS

TPO. PRUEBA	kh/ μ	ϕ_{ch}	X2
4.2340E6	4.1516E-7	1.0248E-6	1.4337E-3
2.1170E6	4.4430E-7	1.0531E-6	2.3045E-3
2.8227E6	4.0218E-7	1.0122E-7	1.5100E-3
1.4113E6	3.2406E-7	9.2227E-7	2.1282E-3

Los datos no contienen información de frontera.
¿Explicación (s/n) ? > S

[RETURN]

Figura 5.6 c).- El sistema concluye que los datos obtenidos no contienen información de frontera.

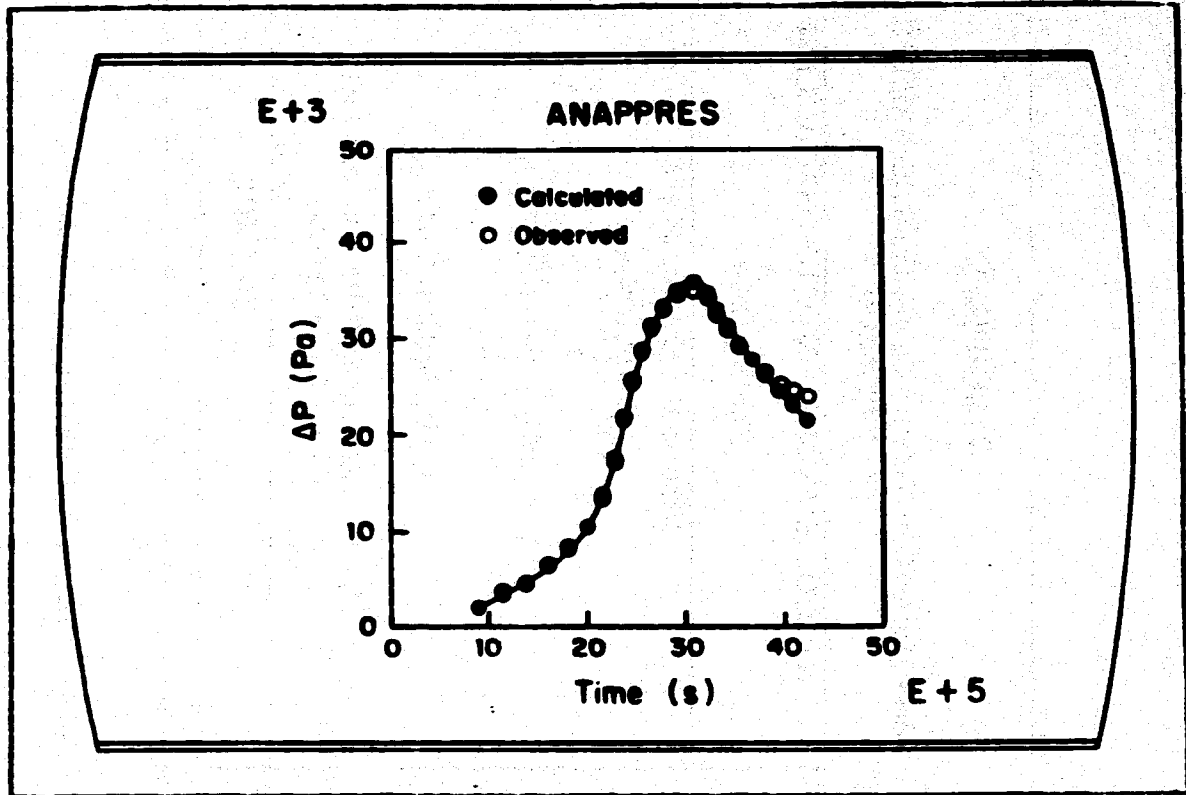


Figura 6.6 d.- Gráfica comparativa de los datos de presión medidos y los calculados.

ANAPPRES

SISTEMA EXPERTO PARA EL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION

N POZOS ACTIVOS-N POZOS DE OBSERVACION

EXPLICACION

Como no se cumple el criterio:

$$(X_1)^2 < (X_2)^2 < (X_3)^2$$

y

$$(kh/\mu)_1 > (kh/\mu)_2 > (kh/\mu)_3$$

ó

$$(kh/\mu)_1 < (kh/\mu)_2 < (kh/\mu)_3$$

Se diagnostica que los datos no contienen información de frontera.

[RETURN]

Figura 5.6 e).- Resumen del análisis de los resultados.

V.4.- CURVA DE THEIS.

La curva de Theis es la solución adimensional a la inyección o producción a gastos constantes de una línea fuente, la cual penetra completamente un medio poroso arealmente infinito, isotrópico, isotérmico y de espesor constante. Este es un caso particular del algoritmo matemático que emplea el SE en el cálculo de las propiedades de la formación. En este caso:

$$\Delta p = (Q\mu)/(2\pi kh) P_D \dots\dots\dots(5.1)$$

$$P_D = 1/2 \int_0^{\infty} (e^{-u}/u) du \dots\dots\dots(5.2)$$

$$u = 1/4t_0 \dots\dots\dots(5.3)$$

$$t_0 = (kh/\mu) (1/\phi ch) (Vr^2) \dots\dots\dots(5.4)$$

en donde:

- h= espesor de la formación productora.
- k= permeabilidad.
- Q= gasto.
- r= distancia a un punto de observación.
- t= tiempo.
- μ = viscosidad dinámica.

para un sistema de unidades consistente.

Para el caso donde $kh/\mu = \phi ch = r = 1$, la ecuación 5.4 se reduce a $t_D = t$. Observe también que si definimos $Q = 2\pi$, la ecuación (5.1) se reduce a $\Delta p = P_D$. Bajo estas condiciones esperaríamos que el SE al analizar los datos de la curva de t_D obtuviera como resultados $kh/\mu = \phi ch = 1$, y que diagnostique que los datos no contienen información de frontera.

En las figuras 5.7a y 5.7b se muestran las conclusiones a las que llegó el SE durante la solución de un problema.

ANAPPRES			
SISTEMA EXPERTO PARA EL ANALISIS DE PRUEBAS DE PRESION			
PRUEBA DE UN SOLO POZO			
TPO. PRUEBA	kh/μ	ϕ_{gh}	X2
1.1110E2	1.0001E0	9.9994E-1	1.6653E-7
2.2220E2	1.0001E0	9.9994E-1	1.6653E-7
3.3330E2	1.0001E0	9.9994E-1	1.6653E-7
Los datos no contienen información de frontera. ¿Explicación (s/n) ? > <u>S</u>			
[RETURN]			

Figura 5.8 a).- Se muestra la conclusión a la que llegó el sistema después de analizar los datos, unidades en S. I.

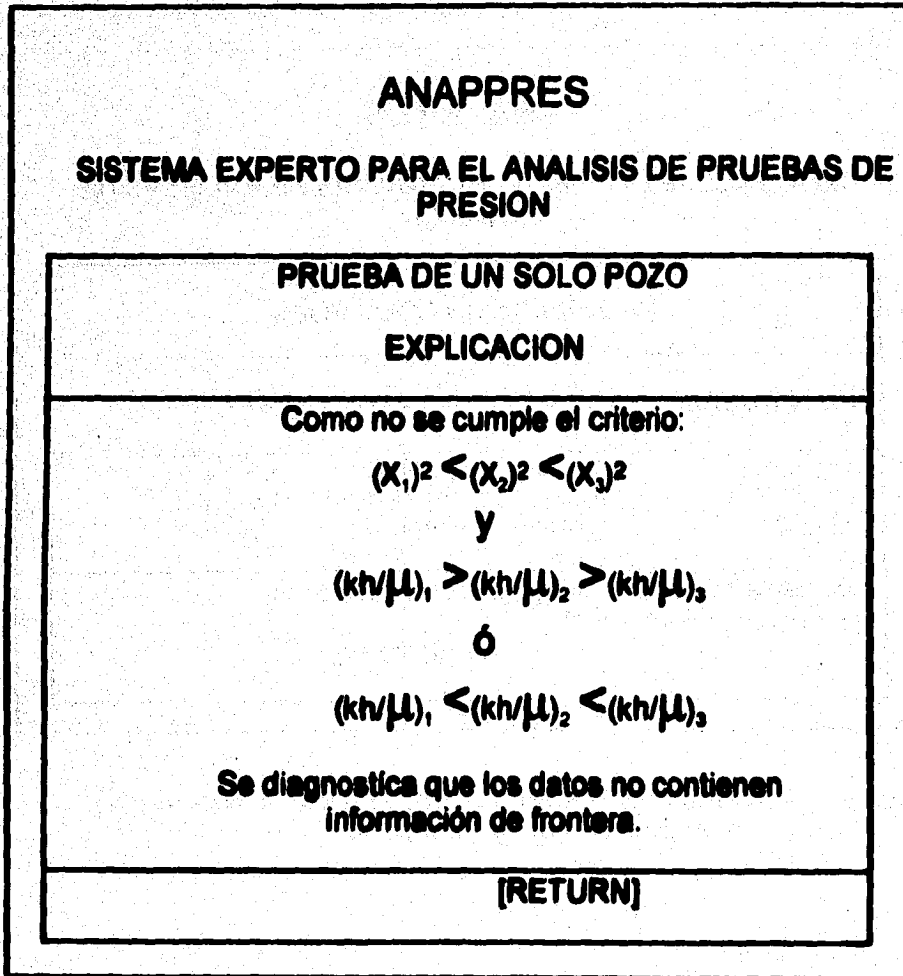


Figura 5.8 b). - Explicación que da el sistema de por qué se llegó a dicha conclusión.

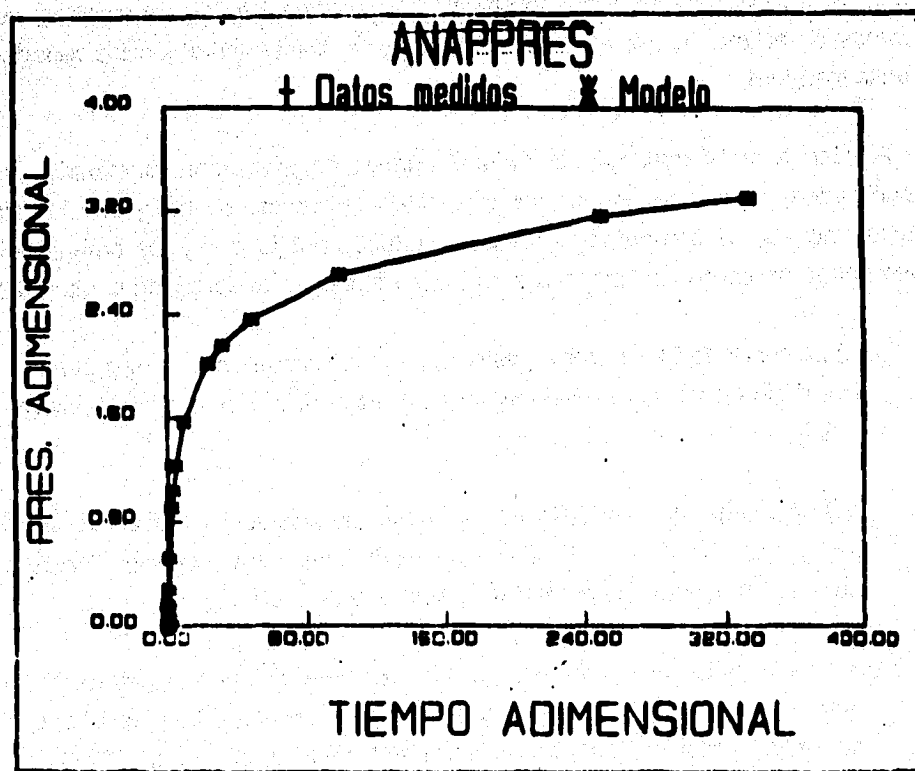


Figura 6.7 c.- En esta gráfica se muestran los datos de presión medidos y los calculados por ANAPPRES.

V.5.- CONCLUSIONES.

En los tres casos analizados en la sección anterior el sistema experto obtuvo los diagnósticos correctos. En el primer ejemplo se observan diferencias relativas muy altas debido, tal vez, a un ajuste no muy apropiado en el método de curva tipo por falta de experiencia de mi parte; en el segundo ejemplo los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento obtenidos por ANAPPRES son muy aceptados. En el tercer problema los valores de los parámetros de la formación estimados por ANAPPRES concuerdan exactamente con los reportados en la literatura.

A la fecha se ha validado con un gran número de problemas, publicados y no publicados, cuyas soluciones eran conocidas. En estas se incluyeron los siguientes incisos, la comparación de los resultados publicados y los obtenidos por ANAPPRES así como las diferencias relativas se pueden observar en la tabla 5.3.

a) La curva de Theis para gasto constante, modelando casos sencillos de interferencia en yacimientos infinitos (Mc Edwards y Benson 1981);

b) una prueba de interferencia a un gasto de producción constante, en los pozos RRGE-1 y RRGE-2 en el Raft River Idaho que no detectó flujo en la frontera (Narasimhan y Witherspoon, 1977);

c) una prueba de interferencia a un gasto de producción constante, entre los pozos 6-1 y 6-2 en el campo geotérmico East Meza, en el que se detectó presión constante en la frontera, (Narasimhan et. al. 1977);

d) una prueba de interferencia a un gasto de producción constante, entre los pozos 31-1 y 38-30 en el campo geotérmico East Meza, en el que no se detectó flujo en la frontera (Narasimhan et. al. 1977);

TABLA 6.3
COMPARACION CON LOS RESULTADOS PUBLICADOS.

Prue- ba	Resultados Publicados		Resultados ANAPPRES		Dif. relativa	
	kh/μ	φch	kh/μ	φch	kh/μ	φch
(a)	1.0	1.0	1.0	0.99999	0.0	-0.00001
(b)	3.81E-7	5.20E-8	4.10E-7	5.00E-8	8.4	-4.1
(c)	3.37E-8	2.60E-7	3.46E-8	2.50E-7	2.7	-3.1
(d)	8.67E-9	9.30E-8	1.11E-8	9.28E-8	25.1	-0.2
(e)	8.23E-7	1.72E-7	7.90E-7	1.70E-7	-4.0	-1.1
(f)	3.85E-7	1.00E-6	4.15E-7	1.02E-6	7.8	2.1
(g)	6.90E-11	1.97E-9	8.10E-11	2.00E-9	17.5	-1.5
(h)	1.27E-10	1.77E-9	1.24E-10	1.54E-9	-2.4	-12.9

kh/μ = [m³ Pa⁻¹ s⁻¹]

φch = [Pa⁻¹ m]

Diferencia relativa en %

e) una prueba de interferencia en un acuífero somero para un proyecto de almacenamiento de energía en el que participaron cinco pozos, cuatro activos y uno de observación (Mc Edwards y Benson, 1981);

f) una prueba de interferencia a un gasto altamente variable en la que participaron cinco pozos en el yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, México, el cual está siendo utilizado actualmente para generar energía eléctrica (Mc Edwards y Benson, 1981);

g) una prueba de interferencia a gasto constante entre dos pozos, en los cuales no se detectó frontera (Earlogher, 1977, ejemplo 9.1); y

h) una prueba de inyección a gasto constante, en la que participaron nueve pozos, en donde el pozo central es el de inyección y los pozos periféricos son pozos de observación, en los cuales no se detectó frontera (Ramey, 1975).

En todos estos casos ANAPPRES obtuvo los diagnósticos correctos, en los casos que hubo diferencias, estas son insignificantes para fines prácticos. También se probó el programa contra un gran número de pozos de prueba con resultados conocidos no publicados.

CONCLUSIONES

Se desarrolló y validó un sistema experto con capacidad para analizar tanto pruebas de interferencia (en las que intervienen n pozos de producción y n pozos de observación) como pruebas de un sólo pozo, en sistemas homogéneos saturados con líquido. De este análisis se obtiene la transmisividad, el coeficiente de almacenamiento y la detección y localización de accidentes hidrológicos, entre otros parámetros.

En el sistema experto ANAPPRES se acoplaron con éxito modelos matemáticos, técnicas de optimización y conocimientos heurísticos. Los modelos matemáticos y las técnicas de optimización le permiten al sistema estimar los parámetros de la formación. Los conocimientos heurísticos le permiten detectar las fronteras hidrológicas y definir su tipo, y en aquellos casos en los que el usuario no tiene una idea aproximada de cuál es la solución a su problema, contribuyen a la determinación de los parámetros de la formación.

El sistema experto ANAPPRES es una poderosa herramienta tecnológica, la cual provee a los especialistas en ingeniería de yacimientos una ventajosa alternativa en el análisis de pruebas de presión. El sistema experto cuenta con cuatro importantes ventajas sobre los métodos convencionales de análisis: 1) maneja gasto variable, 2) es capaz de determinar más de tres parámetros simultáneamente, 3) le toma significativamente menos tiempo efectuar el análisis de una prueba determinada y 4) puede analizar problemas con un número arbitrario de pozos de observación y de producción (inyección), lo que es prácticamente imposible sin una técnica computerizada.

Un usuario puede servirse de ANAPPRES no sólo para hacer análisis con la confiabilidad de un especialista, sino que también puede eventualmente adquirir una destreza análoga a la del experto mediante la observación del comportamiento del sistema.

NOMENCLATURA

- A_n = Gasto al inicio del pulso n [L^3T^{-2}]
 B_n = Pendiente del pulso de producción [L^3T^{-2}]
 c_t = Compresibilidad total del sistema [L^2M^{-1}]
 E_i = Integral exponencial
 h = Espesor de la formación productora [L]
 H = Número de pozos de observación
 J = Número de pozos de producción
 n = Número de pulsos de producción.
 k = Permeabilidad [L^2]
 kh/μ = Tasmisividad [L^4TM^{-1}]
 q = Gasto [L^3T^{-1}]
 p = Presión [$M L^{-2}$]
 P_D = Presión adimensional
 r = Distancia a un punto de observación [L]
 r_D = Radio adimensional
 T = Temperatura [$^{\circ}C$]
 t = Tiempo [T]
 t_D = Tiempo adimensional
 μ = Viscosidad [MLT]
 α = Angulo a la frontera hidrológica [Grados]
 Δp = Cambio de presión [$M L^{-1}T^2$]
 η = Difusividad hidráulica [$L^2 T$]
 ν = Viscosidad dinámica [$ML^{-1}T^{-1}$]
 ϕ = Porosidad [fracción]
 ϕ_{ch} = Coeficiente de almacenamiento [$L^2T^2M^{-1}$]
 τ = Tiempo de producción [T]
 X^2 = Estadístico chi-cuadrado [fracción]

BIBLIOGRAFIA

1. Arellano V. M., Schwarzblat K., Iglesias R. y Arellano G., *Un Sistema Experto para el Análisis de Pruebas de Presión*, Simposio Internacional sobre desarrollo y explotación de recursos geotérmicos, IIE-CCE, pp. 242-249, Cuernavaca Mor. México, octubre 1987.
2. Arellano V. M., Iglesias R. y Arellano J., Pérez R. M., *Automatic Interference Test Analysis in Personal Computers*, Geothermal Resources Council TRANSACTION, Vol. 14, Part II, august 1990.
3. Claus-Peter Dechau, *Máquinas con Juicio e Inteligencia- Inteligencia artificial*, Geomundo, año XVIII N° 4, pp. 375-381, 385-386, Editorial América S. A. México, abril 1994.
4. Earlougher R. C. Jr., *Advances in Well Test Analysis*, SPE Monograph No. 5, Dallas, Texas, 1977.
5. Earlougher R.C. JR., SPE-AIME., Marathon Oil Co., Keith M. Kersch, SPE-AIME, Marathon Oil Co. *Analysis of Short-Time Transient Test Data By Type-Curve Matching.*, JPT pp. 793-794., july, 1974.
6. Economides Michael J., SPE, U. of Alaska; David O. Ogbe, Stanford U., Frank G. Miller, SPE, Stanford U., H.J: Ramey Jr., SPE, Stanford U., *Geothermal Steam Well Testing: State of de Art.*, JPT, Vol. 34 No. 5, pp. 976-980., may 1982.
7. Genascia, J. G., *La Concepción de los Sistemas Expertos*, Mundo Científico, V. 53 No. 5, pp. 1210-1217, México 1986.
8. Hartrell Tim; *Inteligencia Artificial, Conceptos y Programas*; Anaya Multimedia; Publicaciones Cultural, México 1986.
9. Herbert Schildt, *Utilización de C en la Inteligencia Artificial*, Osborne/Mc GRAW-HILL, Interamericana de España S. A. 1989.
10. León Ventura R., *Análisis de Pruebas de Variación de Presión*, IMP Subdirección de Tecnología de Explotación, División de Evaluación de Formaciones, México, 1984.

11. Mompín Poblet J., et al., *Inteligencia Artificial, Conceptos, Técnicas y Aplicaciones*; Serie: Mundo Electrónico, Marcombo, Boixareu Editores, Barcelona-México, 1987.
12. Ramey H. J. Jr., *Interference Analysis for Anisotropic Formations - A Case History*, SPE-AIME, Stanford U., JPT, october 1975.
13. Ramey H. J. Jr., *Pressure Transient Analysis for Geothermal Wells*, Stanford University, Stanford California 94305, USA, pp. 1750-1751.
14. Rich, E., *Inteligencia Artificial*; Colección Ciencia Informática GG/México; Ediciones Grupo Gili S. A. de C.V., México, 1988.
15. Salas Guillermo P. et al., *Geología Económica de México*, Fondo de Cultura Económica, México 1988.
16. Torres Rodríguez V. et al., *Documento de Análisis y Prospección del Programa Universitario de Energía Geotérmica en México*, UNAM Cd. Universitaria, México, 1983.
17. Uren Lester Charles, *Ingeniería de Producción de Petróleo*, Cia. Editorial Continental S. A., Mc GRAW-HILL, pp. 170-177, México, 1985.
18. Valderrábano H. A. et al., *Apuntes de Evaluación de la Producción*; Facultad de Ingeniería UNAM, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Cd. Universitaria, México 1984.