

4) *Signatures*



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**  
FACULTAD DE INGENIERIA

**“ ANALISIS DE UNA RED DE OLEODUCTOS  
MEDIANTE PROGRAMAS DE COMPUTO ”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A:  
ABRAHAM GILBERTO BRIÑEZ JUAREZ

MEXICO. D. F.

1981



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  
EXAMENES PROFESIONALES  
60-1-103

Al Pasante señor ABRAHAM GILBERTO BRINEZ JUAREZ  
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Prof. M. en I. Francisco Sánchez Arredondo, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de INGENIERO PETROLERO.

"ANALISIS DE UNA RED DE OLEODUCTOS MEDIANTE PROGRAMAS DE COMPUTO"

- Introducción
- I.- Teoría
- II.- Aplicación a la red de oleoductos del Distrito Catalina
- III.- Conclusiones y recomendaciones
- Bibliografía
- Referencias

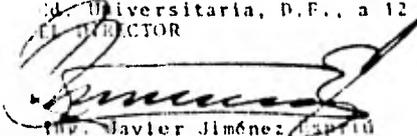
Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente.

"POR MI RAZA PABLARA EL ESPIRITU"

Ed. Universitaria, D.F., a 12 de febrero de 1981

EL DIRECTOR



Dr. Javier Jiménez

MEMRY\* mdb.

## C O N T E N I D O

	pag.
INTRODUCCION	1
I.- Teoría	3
I.1 Ecuaciones de flujo.	3
I.2 Método de Stoner.	10
I.3 Procedimiento de cálculo.	16
I.4 Programa de cómputo.	18
II.- Aplicación a la red de oleoductos del "Distrito Catalina".	25
II.1 Descripción de la red.	25
II.2 Información disponible.	28
II.3 Ajuste del programa de cómputo.	36
II.4 Análisis de puntos críticos.	40
II.5 Análisis de alternativas de ampliación.	42
III.- Conclusiones y recomendaciones.	53
NOMENCLATURA	55
BIBLIOGRAFIA	57

## I N T R O D U C C I O N

El gran incremento en la producción de petróleo crudo en los últimos años en el país, como base de un plan económico establecido, aunado a la creciente demanda de productos refinados, ha traído como consecuencia el crecimiento de la infraestructura petrolera en forma acelerada, parte de esa infraestructura son los oleoductos, quienes juegan un papel muy importante en el sanejo de dicha producción.

Estas circunstancias plantean la imperiosa necesidad de analizar los oleoductos con que se cuenta, con el fin de estudiar la posibilidad de que estos puedan manejar la creciente demanda de producción.

En este trabajo se presenta el análisis del comportamiento de una de las redes existentes en el país. La red a tratar es la denominada " Red de oleoductos del Distrito Catalina ", que maneja el crudo a procesar en las diferentes refinерías del centro del país, las cuales abastecen de productos refinados a las zonas más densamente pobladas.

El trabajo se originó de un proyecto desarrollado en el Instituto Mexicano del Petróleo, que consistió en presentar el análisis de la mayor parte de los ductos existentes, <sup>el</sup> se eligió

---

\*Referencias al final.

de ellos el sistema de oleoductos que presentaba menores posibilidades de incrementar el volumen transportado y se procedió a determinar las alternativas de ampliación del mismo.

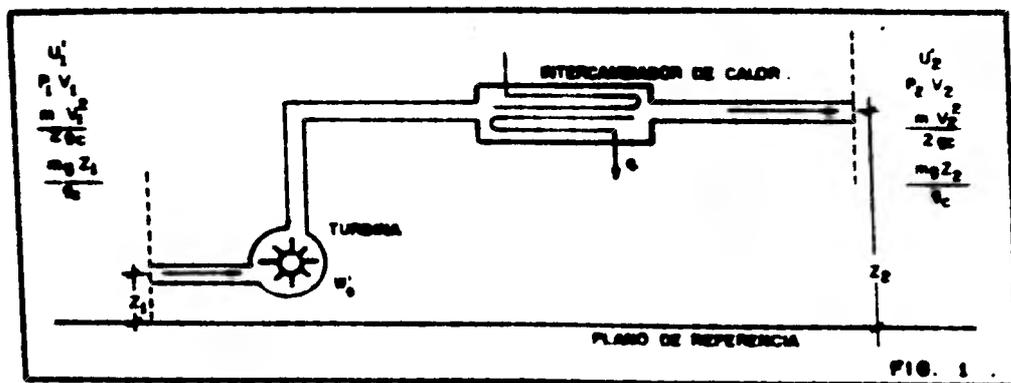
El trabajo se desarrolló bajo la dirección del M. - en I. Francisco Sánchez Arredondo, Jefe del Área de Flujo de Fluidos de la División de Producción a cargo del Ing. Raúl Poblano Ordoñez.

## I.- TEORIA

### I.1.- Ecuaciones de flujo.

La ecuación general que gobierna el flujo de fluidos a través de una tubería es obtenida de un balance macroscópico de la energía asociada al fluido que pasa a través de un elemento aislado del sistema.

Considérese un sistema aislado como el mostrado en la figura.



Tomando en cuenta un régimen de flujo permanente, - el balance de energía puede ser escrito de la siguiente manera:

$$U_1' + p_1 V_1 + \frac{mv_1^2}{2g_c} + \frac{mgz_1}{g_c} + q' + W_s' = U_2' + p_2 V_2 + \frac{mv_2^2}{2g_c} + \frac{mgz_2}{g_c} \quad \text{---(1)}$$

Donde:

$U'$  = Energía interna.

$pV$  = Energía de expansión ó compresión.

$\frac{mv^2}{2g_c}$  = Energía cinética.

$\frac{mgz}{g_c}$  = Energía potencial.

$q'$  = Energía calorífica adicionada al sistema.

$W_s'$  = Trabajo realizado sobre el fluido.

$z$  = Elevación sobre el nivel de referencia.

Dividiendo la Ec.(1) por  $m$ , para obtener la energía por unidad de masa y escribiéndola en forma diferencial, obtenemos:

$$dU + d\left(\frac{p}{\rho}\right) + \frac{v \, dv}{g_c} + \frac{g}{g_c} dz + dq + dW_s = 0 \quad \text{----- (2)}$$

Esta ecuación es difícil de manejar en esta forma - debido al término de energía interna  $U$ . Este término puede reducirse mediante las siguientes relaciones termodinámicas:

$$dU = T dS + \frac{dp}{\rho} - d\left(\frac{p}{\rho}\right) \quad \text{----- (3)}$$

y

$$T dS = -dq + dW_f \quad \text{----- (4)}$$

Sustituyendo (3) y (4) en (2) y sin considerar el trabajo hecho sobre el fluido, obtenemos:

$$\frac{dp}{\rho} + \frac{vdv}{g_c} + \frac{K}{g_c} dz + dW_f = 0 \quad \text{----- (5)}$$

Multiplicando la Ec. (5) por  $\rho/dL$  y considerando la caída de presión positiva en dirección del flujo, tenemos que:

$$\frac{dp}{dL} = \rho \frac{vdv}{g_c dL} + \rho \frac{K}{g_c} \frac{dz}{dL} + \rho \frac{dW_f}{dL} \quad \text{----- (6)}$$

Esta ecuación se acostumbra a escribir como:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_T = \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{ac} + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_e + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_f \quad \text{----- (7)}$$

En donde:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_T = \text{gradiente de presión total.}$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{ac} = \text{gradiente de presión debido a la aceleración.}$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_e = \text{gradiente de presión debido a la elevación.}$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_f = \text{gradiente de presión debido a la fricción.}$$

Suponiendo que el gasto de fluido y el área de flujo son constantes, entonces el término correspondiente a la aceleración es cero y obtenemos la ecuación general que se aplica al flujo de una sola fase en régimen permanente a través de una tubería; aunque para su aplicación se requiere:

- a) Conocer la ecuación de estado del fluido

$$\rho = f(p, T), \text{ y}$$

- b) Establecer alguna relación que proporcione las pérdidas de presión por fricción.

Si consideramos que el fluido, aceite, es incompresible, sin gas disuelto y a una temperatura media de flujo, entonces la densidad puede suponerse constante.

### I.1a.- Pérdidas de Presión por fricción.

Para determinar las pérdidas de presión por fricción en conductos circulares de diámetro constante, Darcy y Weisbach<sup>2</sup> en 1958 dedujeron experimentalmente la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_f = \frac{f v^2 \rho}{2g_c d} \quad \text{----- (8)}$$

La cual también puede obtenerse aplicando análisis dimensional. En esta ecuación  $f$ , es un factor que es función de la rugosidad de la tubería ( $\epsilon$ ) y del número de Reynolds ( $N_{Re}$ ), esta es:

$$f = f(N_{Re}, \epsilon)$$

### I.1b.- Cálculo de $f$ .

El coeficiente de fricción  $f$  se puede determinar mediante diferentes ecuaciones, siendo una de las más aceptadas la de Colebrook y White<sup>3</sup> donde:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2 \log_{10} \left[ \frac{2\epsilon}{d} + \frac{18.7}{N_{Re} \sqrt{f}} \right] \quad (9)$$

Como puede verse, que para el cálculo del factor de fricción con esta ecuación es necesario un proceso iterativo, y se recomienda utilizar la ecuación de Drew, Koo y Mc Adams para to

mar un valor inicial<sup>4</sup>

$$f = 0.0056 + 0.5 N_{Re}^{-0.32} \text{ -----(10)}$$

I.1c.- Pérdidas de presión por elevación.

La variación del gradiente de presión debido a la posición del fluido durante su transporte sólo adquiere el valor de cero cuando el conducto por el cual fluye es completamente horizontal, de lo contrario el valor de dicho gradiente podrá adquirir tanto valores positivos como negativos; esto va a depender de la ganancia ó pérdida de energía potencial que adquiera.

Para su cálculo se requieren las elevaciones que sobre cualquier punto de referencia posean los puntos por los cuales fluye el fluido y su determinación se hace mediante la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_e = \left(\frac{dZ}{dL}\right) \rho \frac{g}{2} \text{ ----- (11)}$$

I.1d.- Energía que se añade al sistema.

Para poder transportar cualquier fluido en un ducto es necesario la mayor parte de las veces adicionar energía al sistema, como es el caso de un oleoducto, donde los mecanismos encargados de esto son las bombas, cuya potencia es calculada mediante

la ecuación (Ec. 12)<sup>5</sup> que se obtiene de la ecuación (Ec. 2), en la que no se consideran los términos correspondientes a energía potencial, energía interna, energía cinética y calor.

$$\eta_P = \frac{Q (P_1 - P_2)}{C E} \quad \text{----- (12)}$$

Es importante mencionar que el factor de eficiencia (E), es difícil de establecer con claridad pues depende de un conjunto de rendimientos que son:

- a) Volumétrico, que va a depender del volumen real desplazado por los pistones de la bomba.
- b) Mecánico, relacionado con el tipo de accionamiento ó transmisión de potencia.
- c) Hidráulico, que indica realmente el funcionamiento de las partes móviles de la bomba.

## I.2.- Método de Stoner.

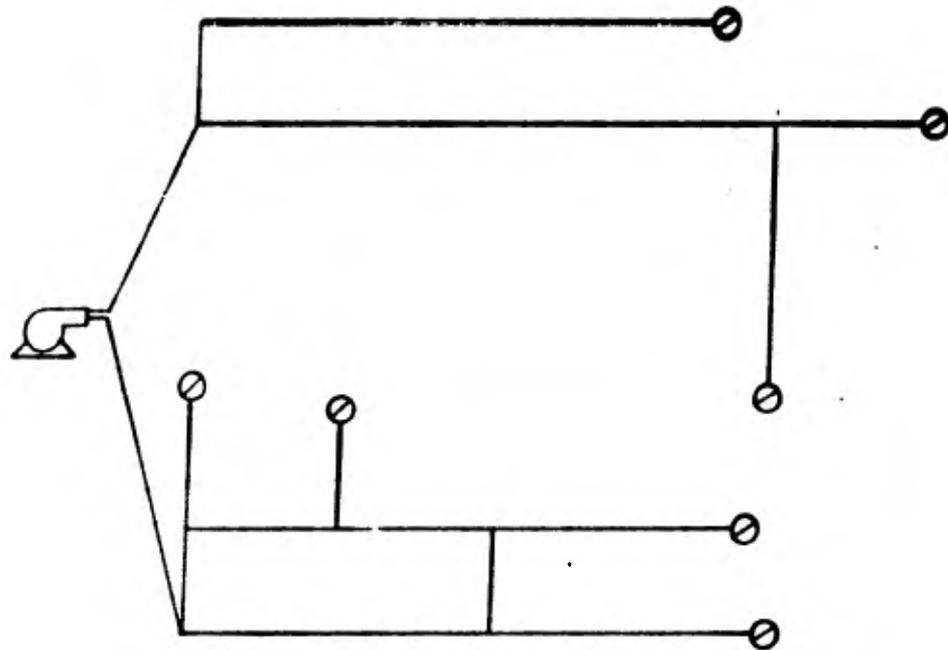
Para determinar la distribución de presiones y gastos en un sistema de tuberías que transporta aceite en régimen permanente existen varios métodos, para el estudio que aquí se presenta se seleccionó el método de M. A. Stoner<sup>6</sup>, pues ha sido utilizado satisfactoriamente en trabajos de diseño<sup>7</sup>.

### I.2a.- Descripción del modelo.

Considerese un sistema de distribución de aceite como el mostrado en la fig. 2, en el cual el régimen de flujo es permanente. El sistema consiste en una red de tuberías y otros elementos, tales como bombas, que permiten transportar el aceite a varios puntos.

Cualquier red de este tipo puede ser descrita en términos de "nodos" y "conectores de nodos", como se muestra en la figura 3. Los nodos representan físicamente puntos en donde terminan los elementos del sistema, ó en donde se extrae ó adiciona aceite al sistema. Los conectores de los nodos representan elementos a través de los cuales hay intercambio de masa de un nodo a otro.

En un sistema pueden existir diferentes tipos de conectores (tuberías, bombas, reguladores, etc.); Aunque para el caso sólo se tomarán en consideración las tuberías y las bombas. Al

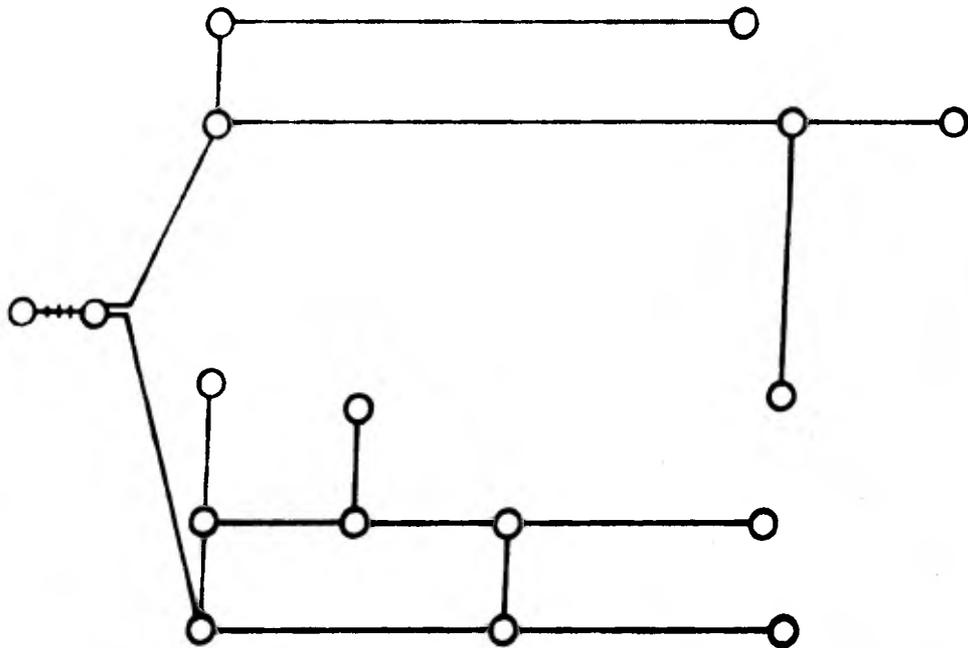


⊘ PUNTO DE ENTREGA

SISTEMA HIPOTETICO DE DISTRIBUCION DE ACEITE

TESIS PROFESIONAL  
ABRAHAM BRIZ JIMENEZ

FIG. 2



○ NODO.

DIAGRAMA DE NODOS DE UN SISTEMA HIPOTETICO DE ENTRENAMIENTO DE AGENTES .	
TERCER PROFESIONAL ABRAMAM BRUNEL JAMES	FIG. 5

Conjunto de conectores se le denominará con P y al de nodos con N.

En un sistema como el descrito, con flujo de aceite en régimen permanente, se debe satisfacer la ley de la conservación de la masa en cada uno de los nodos, por lo tanto, se debe cumplir la siguiente expresión:

$$F_i = \sum_{j=1, \dots, N} S_{ij} q_{ij} + Q_i = 0 \quad \text{--- (13)}$$

en donde:

$S_{ij}$  es una variable que indica el sentido de flujo.

$q_{ij}$  es el gasto que pasa a través del conector de los nodos ij.

$Q_i$  es un término que indica la adición o extracción de masa al sistema a través del nodo i.

j representa a todos los nodos relacionados al nodo i mediante un conector.

Estas ecuaciones establecen simplemente que la masa que entra al nodo es igual a la que sale y describen convenientemente la interacción de los diferentes elementos del sistema.

También para cada tipo de conectores pueden asociarse ecuaciones que relacionen el gasto ( $q_{ij}$ ) con la presión del fluido en sus extremos (nodos ij)

Para tuberías se utiliza las ecuaciones (8) y (11) mostradas anteriormente y se pueden reducir algebraicamente a la forma

$$q_{ij} = C_{ij} [(p_i - p_j) - \rho(z_i - z_j)]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

en donde:  $C_{ij}$  es un coeficiente de transmisión de la tubería que depende de la geometría del tubo y de las condiciones de flujo.

$p_i$  , es la presión en el nodo inicial.

$p_j$  , es la presión en el nodo final.

$z_i$  , es la elevación del nodo inicial.

$z_j$  , es la elevación del nodo final.

Para otro tipo de conectores, tales como bombas, se pueden establecer ecuaciones semejantes a la (14).

Las ecuaciones de balance en los nodos pueden expresarse, en términos de la presión del fluido en ellos, mediante la sustitución de la Ec. (14) en la (13), esto es:

$$F_i = \sum S_{ij} C_{ij} [(p_i - p_j) - \rho(z_i - z_j)]^{\frac{1}{2}} + q_i = 0 \quad (15)$$

Cuando el sistema está balanceado  $F_i$  será cero y -

los flujos exteriores  $Q_i$  también estarán balanceados, así:

$$\sum_1 Q_i = 0 \quad \text{-----} \quad (16)$$

Entonces el problema consiste en determinar un conjunto de valores  $Q_i$  y  $P_i$  para toda  $i$  en  $N$ , que satisfaga las ecuaciones (15) y (16).

Bajo ciertas condiciones, es posible resolver un sistema de  $N$  ecuaciones con  $2N$  incógnitas ( $N$  valores de  $P$  y  $N$  valores de  $Q$ ), por lo que se requiere asignar valores a  $N$  variables para dar solución al sistema de ecuaciones no lineales planteado, siendo las  $N$  variables restantes las incógnitas.

Las ecuaciones se resuelven mediante la aplicación del método de Newton Raphson para  $N$  dimensiones, el cual transforma al sistema de ecuaciones en lineales y para la solución de estas últimas se utiliza el método de eliminación de Gauss modificado para operar únicamente con los elementos de la matriz que son diferentes de cero. Los resultados son un conjunto de correcciones que, sumados a los valores anteriores, harán que estos se acerquen a la solución del sistema. Las iteraciones se continúan hasta que los valores calculados satisfagan las ecuaciones de balance.

### **I.3.- Procedimiento de cálculo.**

Para poder realizar cualquier análisis en un sistema de flujo existente con el modelo descrito, requiere de un procedimiento, y el objetivo que persigue este inciso es presentarlo:

1) Se recabó información concerniente a:

a) Instalaciones existentes, tales como especificaciones y -- longitud de tuberías, potencia en las estaciones de bombeo, elevaciones del terreno y diagrama de flujo de la red.

b) Condiciones de operación de las tuberías y estaciones, como son las presiones de succión y descarga y los gastos a manejar, la temperatura de flujo y las condiciones ambientales.

c) Características físicas del fluido a transportar.

Conocida esta información se procedió a codificarla de acuerdo a formatos requeridos por un programa de cómputo.

11) Ajuste: Basados en la información anterior, se simuló el comportamiento del sistema a tratar mediante el uso del programa de cómputo. El resultado de distribución de presiones se comparó con las presiones medidas correspondientes y de esta forma se determinó lo que se llama "factor de ajuste", el cual representa la diferencia entre lo medido y lo calculado. Este factor aplicado a cada uno de los conectores proporciona lo que se llama ajuste del

modelo matemático ó validación del mismo. Cabe aclarar que el factor contiene implícita la eficiencia del conector que se trate.

iii) Determinación de puntos críticos: Se consideran puntos críticos a aquellos en los cuales los conectores no tienen la capacidad para manejar un gasto mayor que el transportado actualmente, su determinación requirió establecer la siguiente información como datos en el programa de cómputo:

a) La presión de descarga en las bombas se consideró el 80% de la presión de prueba en las tuberías.

b) Los gastos de inyección y extracción se manejaron como incógnitas, mientras que las presiones en esos puntos se proporcionarán como datos.

Con esta información el programa determinó los gastos a manejarse en cada uno de los conectores y aquel conector que no pudo transportar un gasto mayor al de la información original se estableció como punto crítico.

Ajustado el programa de cómputo a la información y conocidos los puntos críticos del sistema a estudiar, se planearon de acuerdo a las necesidades requeridas las alternativas a proporcionar soluciones para mejorar las condiciones de operación y aumentar la capacidad del sistema.

#### 1.4.- Programa de cómputo.

El método de cálculo mostrado anteriormente se encuentra programado<sup>8</sup> en lenguaje FORTRAN para ser manejado en computadoras electrónicas, esto con el fin de simular sistemas que requieren de gran cantidad de cálculos en un tiempo razonable. El programa pertenece a la División de Producción del Instituto Mexicano del Petróleo y posee las siguientes características:

1.- Proporciona la distribución de presiones y gastos en un sistema que maneja aceite en régimen permanente.

2.- El sistema analizado puede estar constituido por tuberías y bombas.

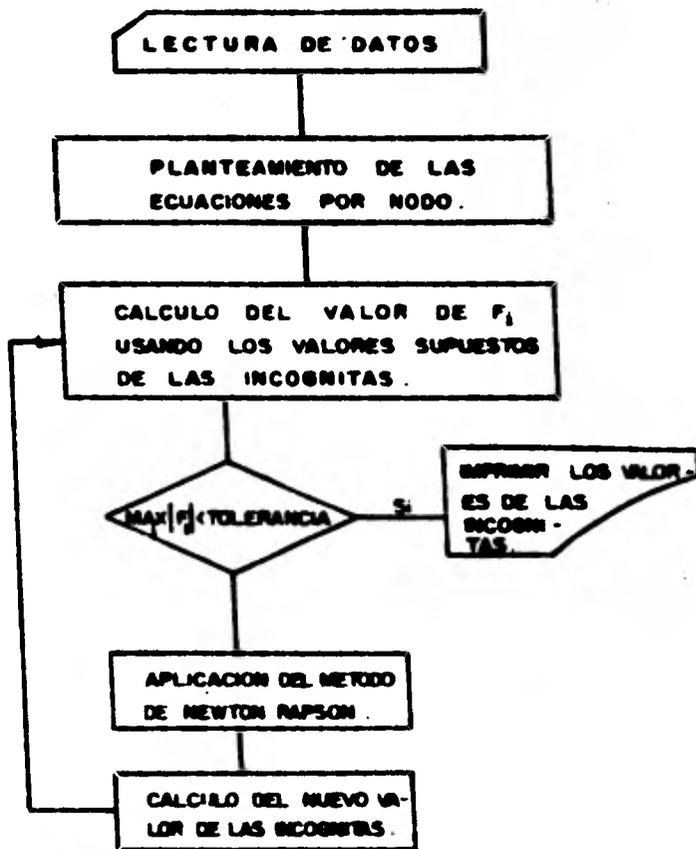
3.- Proporciona la distribución de presiones cuando se cambian diámetros, potencias y gastos manejados en el sistema.

De acuerdo a estas características puede tener las siguientes aplicaciones:

1.- Diseñar y optimizar sistemas de distribución de aceite.

2.- Cuantificar el efecto de cambios de un sistema o de sus condiciones de operación.

FIG. 4 - DIAGRAMA GENERAL DE FLUJO DEL PROGRAMA DE COMPUTO



**3.- Determinar capacidades máximas de un sistema.**

para su aplicación el programa requiere de la siguiente información:

a) Para los nodos se necesita conocer la presión, gasto que entra ó sale y la elevación del mismo sobre un nivel de referencia establecido.

b) Características de los conectores como son: diámetro, longitud y rugosidad en el caso de tuberías, potencia en el caso de que sean bombas.

c) Para el fluido las características a conocer son: viscosidad y densidad a la temperatura de flujo dada. (Tab. 1)

Esta información puede ser procesada en dos diferentes sistemas de unidades que son:

Datos	Sistema 1	Sistema 2
Longitud	metros	kilómetro
Elevación	metros	metros
Gasto	Bl/día	MM <sup>3</sup> /día
Presión	lb/pg <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Potencia	HP	HP
Diámetro	pg	pg

Temperatura	°F	°C
Densidad	°API	gr/cc
Viscosidad	cp	cp

(Ver tabla 1')

Los resultados obtenidos del programa son:

- 1.- Presión en el nodo que el gasto fue dato y viceversa.
- 2.- Gasto manejado por los conectores, ya sea bomba ó tubería.
- 3.- Sentido de flujo del aceite transportado.
- 4.- Coeficiente de transmisión, que corresponde a  $C_{1j}$  de la ecuación de flujo de los elementos conectores (Ec. 14.)

(Tab. 2)

CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE GASTOS Y PRESIONES EN UN SISTEMA

TABLA I - REGIMEN PERMANENTE

DE LOS DUCTOS DEL DISTRITO CATALANA

• I N F O R M A C I O N  
 • • • • •

TEMPERATURA DE FLUJO: .3070\*02  
 DENSIDAD DEL LIQ.: .8706\*00  
 VISCOSIDAD DEL LIQ.: .2593\*00  
 VISCOSIDAD DEL SISTUB.: .1592\*03  
 TOL. BALANCE DE MODOSE: .1392\*01  
 EFICIENCIA DEL SISTUB.: .6292\*01  
 NO. MAXIMO DE ITERAC.: 25  
 TIPO DE UNIDADES: 2  
 TIPO DE MUESTREO: 0  
 ORDENAMIENTO DE MODOSE: 0  
 TIPO DE LIC. DEL TIPO: 1  
 CONTROL SALTO DE PAG.: 0

• P A R A M E T R O S C A L C U L A D O S •  
 • • • • •

NUMERO DE MODOSE: 16  
 NUMERO DE CONECTORES: 15  
 CIL. PARA TUBERIAS: .6719\*02  
 CIL. PARA LAS BOMBAS: .6694\*03

TABLA I



NOTA  
 SI APARECEN PRESIONES NEGATIVAS,  
 PUEDE SER DEBIDO A QUE EL CONECTOR NO TIENE  
 CAPACIDAD, O A QUE SE TIENE UN ERROR EN LOS  
 DATOS DEL CONECTOR. REVISAR DICHO CONECTOR.

RESULTADOS CORRIJIDA 1

SE ALCANZO CONVERGENCIA EN 4 ITERACIONES

NODOS		IDENT.	TIPO	TUBERIA		CONDICION	COEFICIENTE	FACTOR DE	SASTO		PRESIONES	
INICIAL	FINAL			LONGITUD	DIAMETRO	POTENCIA	CC	CONVECCION		ENTRADA	SALIDA	
I	J			(KM)	(PS)	(MP)	TRANSMISION	DEL CONEC.	(MP/CM2)	(KG/CM2)	(KG/CM2)	
POZAC1	E1NS2	TU31	TUB.	52.562	23.312		5857.3231	1.0000	71.543	122.000	10.022	
E1NS2	E1ND4	B1	BOMB.			17637.000	7146571.6250	1.0000	71.543	10.022	110.178	
E1ND4	E2NS6	TU31	TUB.	10.945	23.312		14995.1365	1.0000	71.543	110.599	6.712	
E2NS6	E2NCS	B2	BOMB.			12432.000	5552479.6250	1.0000	71.543	6.912	78.002	
E2NCS	E3NS10	TU31	TUB.	24.110	23.312		7387.2877	1.0000	71.543	98.002	10.806	
E3NS10	E3ND12	B3	BOMB.			15655.000	9245217.8125	1.0000	71.543	10.806	125.259	
E3ND12	N00014	TU31	TUB.	10.760	23.312		11151.9287	1.0000	71.543	125.259	8.069	
N00014	E4NS16	TU3	TUB.	10.760	23.312		15511.5059	1.0000	71.547	8.069	8.255	
E4NS16	E4ND18	B4	BOMB.			7789.000	1102331.6562	1.0000	71.543	8.255	55.898	
E4ND18	J1NA20	TU31	TUB.	81.321	23.312		5531.9172	1.0000	54.351	65.598	28.239	
E4ND18	A12C27	TU31	TUB.	126.545	19.700		2181.1221	1.0000	17.499	65.598	74.139	
J1NA20	TU422	TU32	TUB.	16.156	19.562		7715.5337	1.0000	27.922	28.239	18.689	
J1NA20	E5NS24	TU31	TUB.	43.287	23.312		5312.9719	1.0000	25.229	28.239	18.689	
E5NS24	E5ND26	B5	BOMB.			1699.000	1743139.3579	1.0000	25.229	18.689	38.719	
E5ND26	SALAMA	TU32	TUB.	198.770	19.100		2438.0591	1.0000	25.229	38.719	5.291	

TERMINACION

NOTA  
 CUANDO EN ESTA TABLA EL  
 VALOR ES NEGATIVO (-),  
 SIGNIFICA QUE EL FLUJO  
 VA DEL NODO J AL NODO  
 I EN EL CONECTOR.

SISTEMA CALCULADOR POR NODO  
 NODOS QUE NO FUERON DATOS  
 NODO NODO COSTO  
 TRANSMISION

## II.- APLICACION A LA RED DE OLEODUCTOS DEL DISTRITO CATALINA.

### II.1.- Descripción de la red.

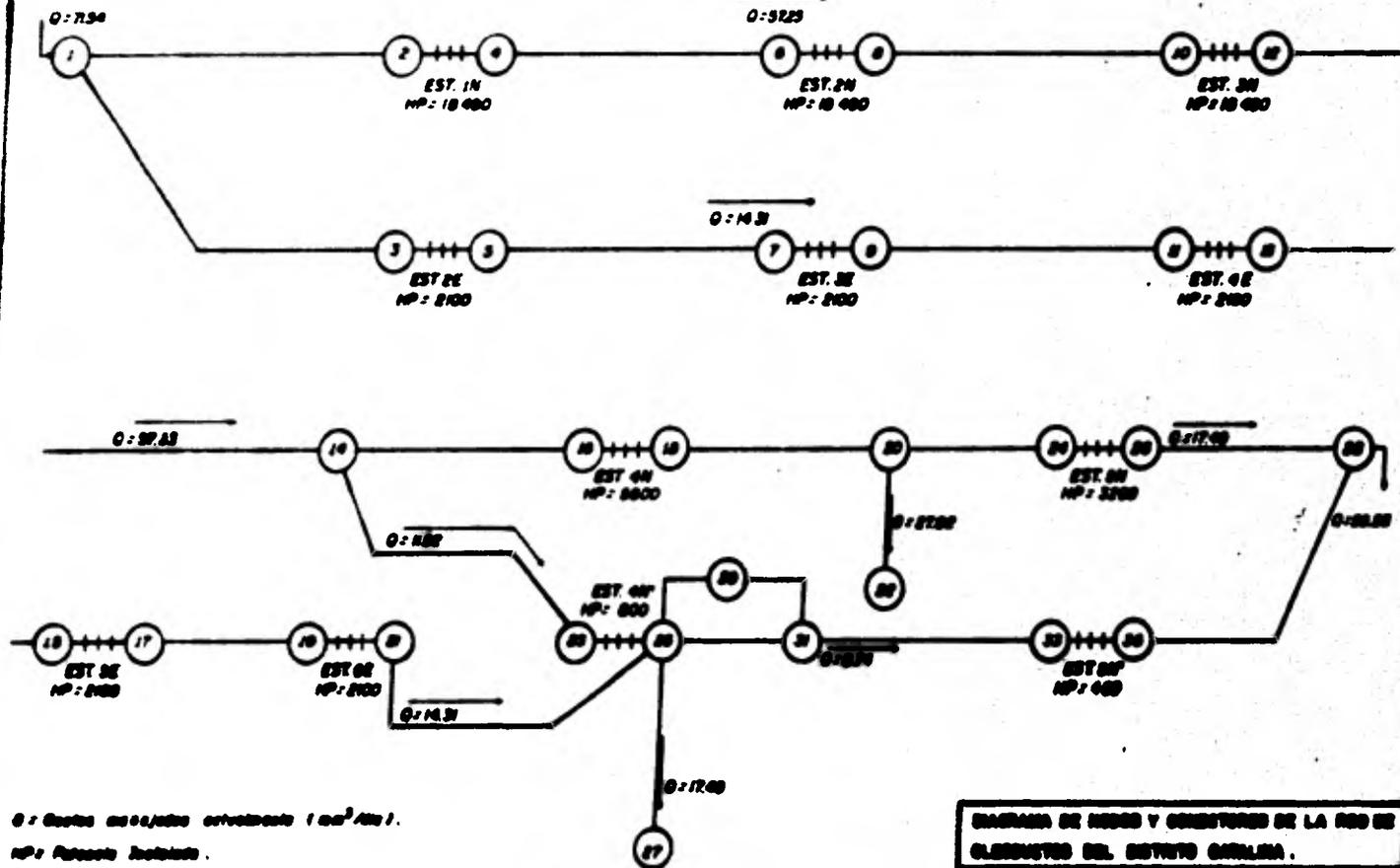
La red de oleoductos del Distrito Catalina presenta gran complejidad en su operación, por lo que se decidió analizarla mediante el procedimiento descrito anteriormente. Dicha red tiene su origen en la ciudad de Poza Rica Ver. y su destino final en la ciudad de Salamanca, Gto. , con derivaciones para distribución en las refinerías del centro del país, como son la refinería de Tula, Ego. y Azcapotzalco, D.F. .

La característica y problema principal de esta red de oleoductos es lo difícil de la topografía sobre la que se encuentra. Partiendo el fluido de elevaciones de 55 msnm en la ciudad de Poza Rica, alcanza elevaciones hasta de 2245 msnm en la ciudad de México.

La red está formada principalmente por dos tuberías paralelas de 18 y 24 pg y cuenta con 12 estaciones de bombeo para el adicionamiento de energía al sistema. (fig 5).

El fluido a manejar en esta red es una mezcla de aceites procedentes de la zona sur del país con características diferentes.





Q = Caudal máximo permitido (m<sup>3</sup>/seg).  
 NP = Potencia instalada.

ESQUEMA DE REDES Y CONDUCTOS DE LA RED DE  
 ALIMENTACIÓN DEL DISTRITO CAROLINA.  
 TERCER PROYECTO.  
 ABRIL DE 1968

En las tuberías se optó por tomar el menor diámetro interno que podían tener cada una de ellas en particular; esto fue debido a las posibles reducciones del mismo como consecuencia de las depositaciones de materiales sólidos en las paredes de las tuberías.

Para más detalle se anexa una figura del diagrama de nodos, (fig.6), así como también una tabla de gastos y presiones medidas en cada uno de los nodos del sistema (tab. 3) .

## II.2.- Información disponible.

La información a continuación expuesta fue proporcionada por la Subdirección de planeación y estudios económicos -- del Instituto Mexicano del Petróleo.<sup>1</sup>

### II.2a.- Características de los fluidos.

A continuación se presenta una tabla donde se indica la variación de la viscosidad Vs. la temperatura para los fluidos manejados, así como también el porcentaje del volumen componente de la mezcla.

TEMPERATURA(°C)	VISCOSIDAD (cp)	
	AREA MARINA(37%)	AREA TERRESTRE(63%)
20	421.22	13.50
30	183.17	8.18
40	133.96	5.18

**Tab. 3.- INFORMACION ORIGINAL  
PRESIONES Y GASTOS EN CADA NODO.**

NODO	PRESION (kg/cm <sup>2</sup> )	GASTO (MM <sup>3</sup> /DIA)
1	70.00	71.54
2	15.47	57.23
3	2.95	14.31
4	102.67	57.23
5	45.01	14.31
6	7.03	57.23
7	5.00	14.31
8	66.81	57.23
9	50.01	14.31
10	15.47	57.23
11	3.00	14.31
12	98.45	57.23
13	45.01	14.31
14	-	57.23
15	6.01	14.31
16	6.00	45.31
17	48.01	14.31
18	32.01	45.31
19	7.00	14.31
20	-	45.31
21	55.01	14.31
22	7.00	27.82
23	31.01	11.92
24	9.91	17.49

<b>NODO</b>	<b>PRESION (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>GASTO(MM<sup>3</sup>/DIA)</b>
25	59.02	38.15
26	36.01	17.49
27	7.01	17.49
28	4.00	26.23
29	-	variable
31	-	8.47
33	6.00	8.47
35	25.01	8.47

La viscosidad de la mezcla a temperatura media de flujo se determinó con los datos anteriores mediante la siguiente ecuación:

$$U = \mu_1^{1-x} \cdot \mu_2^x$$

donde: U es la viscosidad media de la mezcla.

$\mu_1$  y  $\mu_2$  son las viscosidades de los fluidos a mezclarse.

1-x y x son los porcentajes de los fluidos a mezclarse.

Para este caso la viscosidad media de flujo fue de 25.83 cp @ 30 °C

Para la determinación de la densidad de la mezcla y debido a que no se contó con datos de densidad, partiendo del valor hallado para la viscosidad media encontrado anteriormente, se utilizó la ecuación de la correlación presentada por Beggs H. D. y Robinson J. R.<sup>4</sup> para aceites residuales, la cual a continuación se expone:

$$X = \log (\mu - 1)$$

$$Y = \frac{X}{T - 1.163}$$

$$Z = \log Y$$

$$\bullet \text{API} = \frac{[Z - 3.0324]}{[-0.02023]}$$

Se obtuvo un valor de densidad de 31.0263 °API, que convertido a unidades prácticas es:

$$\rho = 0.8706 \text{ gr/cc}$$

II.2b.- Características de las tuberías y bombas.

En las tablas 4, 5 y 6 se pueden observar las diferentes características tanto de las tuberías como de las bombas.





FIG. 5- CARACTERISTICAS DE LAS BOMBAS.

LOCALIZACION				No. UNIDADES		POTENCIA (HP)			PRESION (kg/cm <sup>2</sup> )		TEMP. (°C)	ACCIONA- MIENTO
NOSES	ESTACION	KILOMETRAJE	ELEVACION (mtp.)	OPERACION	RELEVO	INSTALADA	OPERACION	UNITARIO	SUCCON	DESCARGA		TIPO
2-4	14 , Simeo , Puc.	52 + 900	283	4	1	15,400	15,400	3x3,000 2x4,000	6.47	62.07	20	TURBINA DE GAS
6-8	26 , Zapotal , Puc.	63 + 410	1,21	4	0	15,400	15,400	3x3,000 2x4,000	7.00	65.01	20	TURBINA DE GAS
10-12	38 , El Pano , Puc.	67 + 520	1,625	4	1	15,400	15,400	3x3,000 2x4,000	6.47	65.45	20	TURBINA DE GAS
15-17	40 , Cima de Togo , Hgo.	117 + 750	2,507	4	4	5,600	2,800	3x4 00	6.0	32.01	20	MOTOR ELECTRO
20-22	52 , Tuxtilla , Hgo.	142+080	2,09	3	5	3,800	1,200	3x4 00	6.00	35.01	27	MOTOR ELECTRO
3-5	22 , Estacion Lomas , Puc.	58 + 080	470	2	1	2,100	1,400	3x700	2.00	45.01	20	MOTOR ELECTRO
7-9	32 , Las Pias , Puc.	64 + 100	900	2	1	2,100	1,400	3x700	6.0	55.01	20	MOTOR ELECTRO
11-13	42 , Secoto , Puc.	66 + 00	1540	2	1	2,100	1,400	3x700	3.0	45.01	20	MOTOR ELECTRO
16-17	52 , Catatlan , Puc.	96 + 560	1,730	2	1	2,100	1,400	3x700	6.0	45.01	20	MOTOR ELECTRO
19-21	62 , Barajas , Puc.	107 + 200	2,40	2	1	2,100	1,400	3x700	7.0	55.01	20	MOTOR ELECTRO
23-25	44' , Cima de Togo , Hgo.	117 + 750	2,507	1	1	1,200	800	3x400	31.01	55.01	27	MOTOR ELECTRO
28-30	52' , Tuxtilla , Hgo.	117 + 750	2,09	2	1	800	400	2x4 00	6.0	25.01	27	MOTOR ELECTRO

### II.3.- Ajuste del programa de cómputo.

Para efectuar el ajuste del programa de cómputo a las condiciones reales de flujo se efectuaron las siguientes operaciones:

a) Se estableció la presión de inyección en Poza Rica.

b) Se establecieron los gastos en los puntos de extracción.

c) Mediante el programa se determinó el valor de la potencia efectiva\* en las estaciones de bombeo, ya que la información solo proporciona la potencia nominal<sup>+</sup> instalada y en operación.

d) En alguno de los casos se procedió a calcular las presiones de succión y descarga de las bombas debido a la información inadecuada de algunos puntos del sistema, como son los casos que a continuación se exponen:

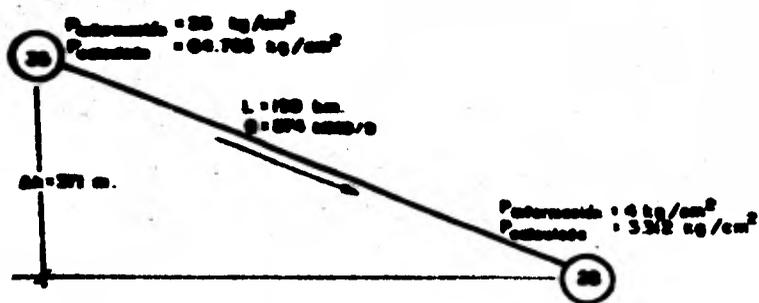
1) En la tabla 3 se observa que la presión reportada en el nodo 21 es menor que la presión en el nodo 25 y éste último posee mayor elevación.

---

\* Potencia que realmente se transmite al fluido.

+ Potencia proporcionada por los motores.

21.)



donde:  $\Delta P_{información} = 21 \text{ kg/cm}^2$   
 $\Delta P_{calculada} = 61.45 \text{ kg/cm}^2$

Desglosando la caída de presión total calculada en la correspondiente a fricción y elevación:

$\Delta P_f \text{ calculada} = 93.65$   
 $\Delta P_e \text{ calculada} = -32.2 \text{ kg/cm}^2$

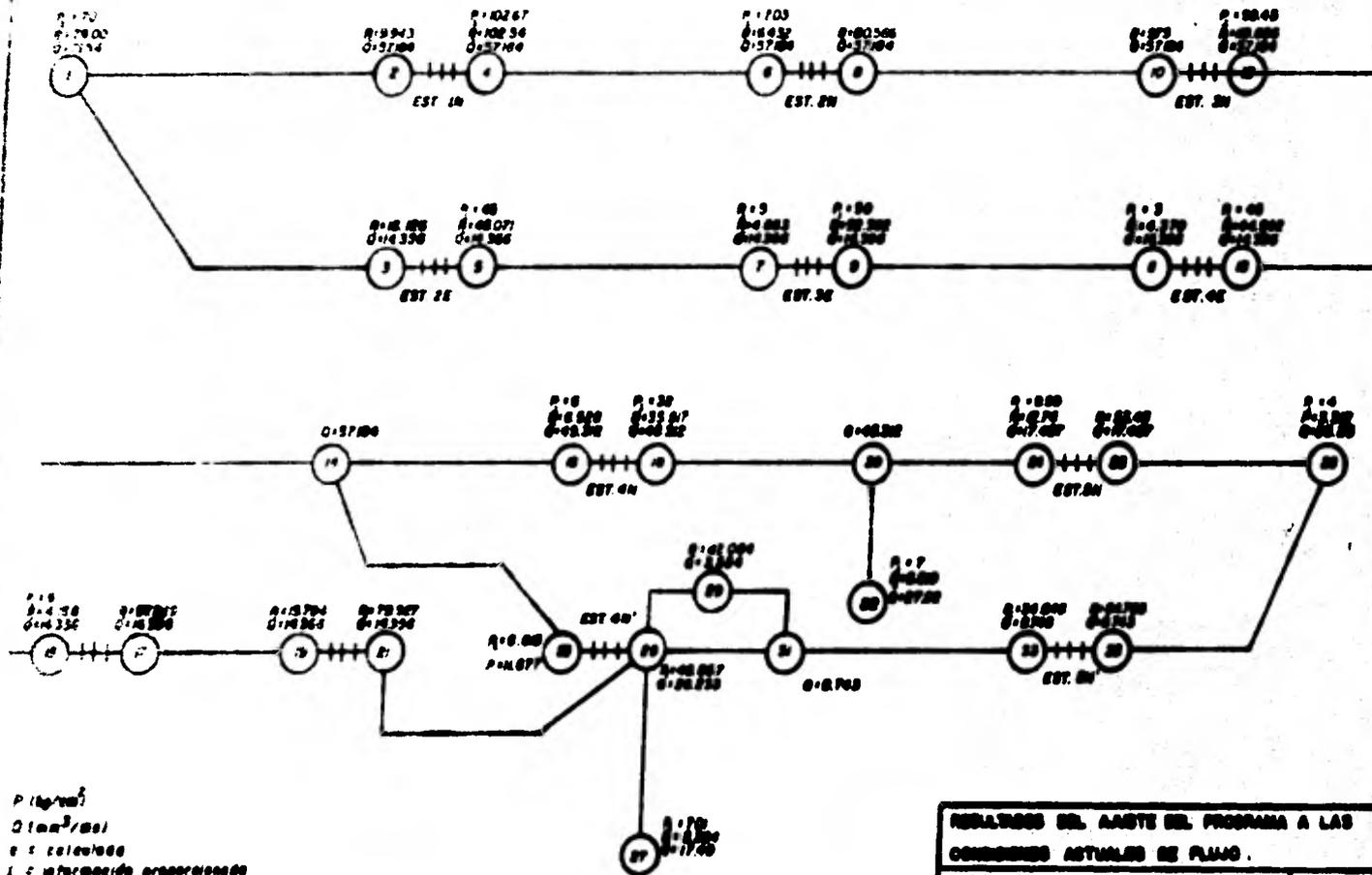
El signo menos (-) indica ganancia por inclinación; si consideramos que la presión por elevación medida corresponde a la calculada, entonces la diferencia fundamental se encuentra en la correspondiente a la fricción.

$\Delta P_f \text{ información} = 53.2 \text{ kg/cm}^2$

Sin embargo estas diferencias -  
no se presentan en otros conectores.

Por estas razones se decidió no considerar aquellas mediciones que presentaban estas irregularidades.

Como puede observarse en la fig. 7, la ecuación calculó sobrecargas de presión respecto a las medidas en algunos conectores, sin embargo en la mayoría calculó bajocargas de presión; por tal motivo y aunado a lo explicado en el párrafo anterior, no se consideraron algunas presiones medidas, solo las que se indican en la figura 7. Respecto a los gastos se puede observar que los calculados son muy similares a los medidos.



RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL PROGRAMA A LAS  
 CONDICIONES ACTUALES DE FLUJO.  
 TERCER PROPONERIAL  
 AGUSTÍN GÓMEZ JIMÉNEZ

#### II.4.- Análisis de puntos críticos.

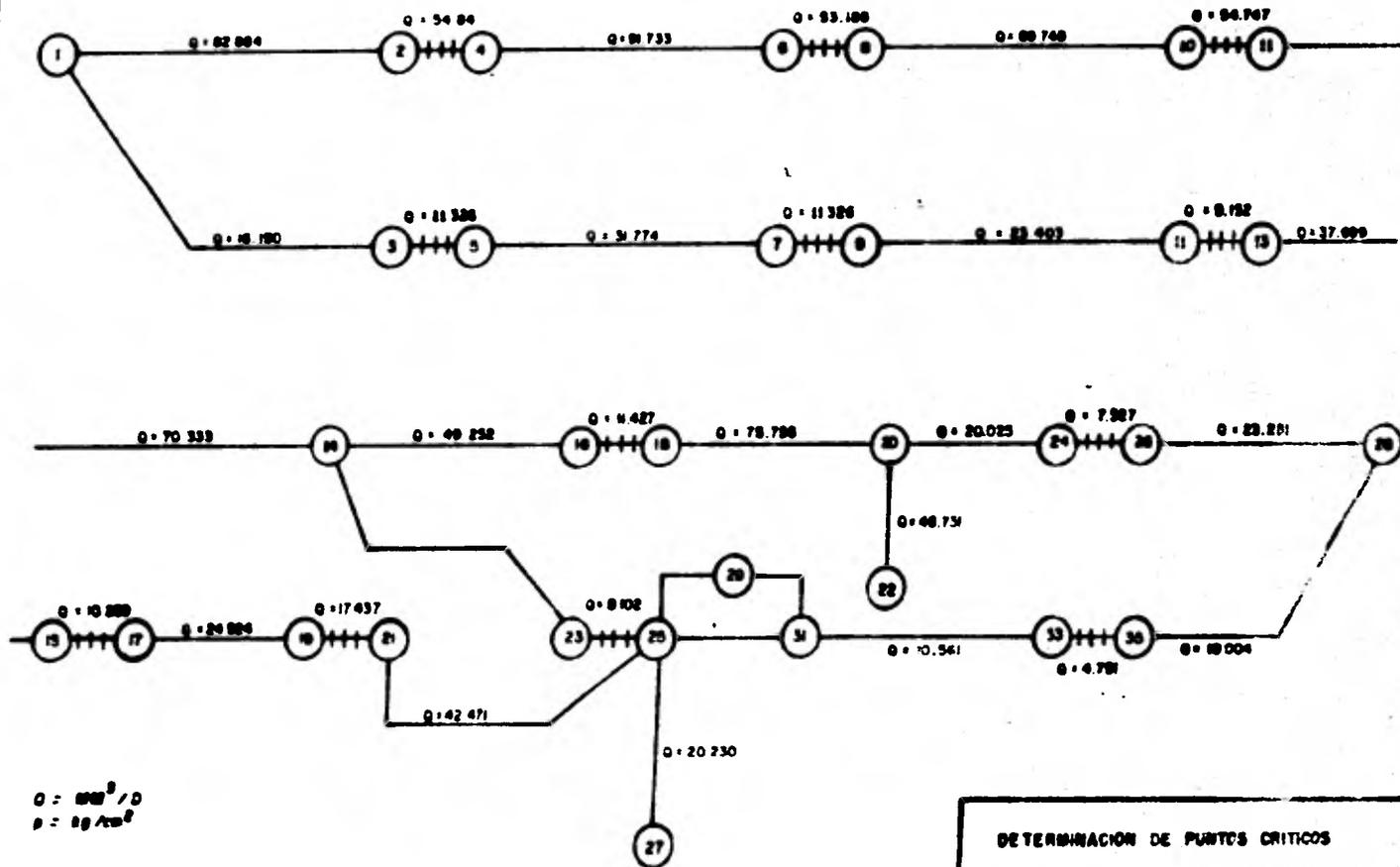
Una vez ajustado el programa de cómputo a las condiciones de operación actuales, se procedió a suministrarle al programa la siguiente información:

- a) Presión de succión de las bombas igual a la determinada en el ajuste.
- b) Presión de descarga en las bombas igual al 80% de la presión mínima de prueba.
- c) Los gastos de inyección y extracción se manejan como incógnitas, mientras que las presiones fueron conocidas.

De esto se obtuvo la conclusión de que la red presenta los siguientes puntos críticos:

- a) la sección de tubería que va de los nodos 25 a 26.
- y
- b) Todas las estaciones de bombeo.

Los resultados de esta operación pueden verse en la figura 8.



$$Q = \frac{4000^2}{D}$$

$$D = 10^4 \text{ m}^2$$

DETERMINACION DE PUNTOS CRITICOS	
TESIS PROFESIONAL	FIG. 8
ADRIAN BRIZ AMEZ	

## II.5.- Análisis de alternativas de ampliación.

El análisis de los puntos críticos y la determinación de las capacidades de los conectores en la red, más que con el fin de proporcionar las fallas de operación que sufre el sistema, se realizó con la intención de conocer un panorama más amplio de la red, para con este poder decidir en un momento determinado las alternativas de modificación y ampliación en el caso de aumento de la demanda ó cambios en la operación del sistema.

Cabe aclarar que las alternativas a continuación presentadas, en todo momento están enfocadas a un supuesto aumento en la capacidad de refinación y muestran soluciones tendientes a proporcionar la información necesaria para operar el sistema en forma eficiente, aunque su forma original de operación no sea la misma. Es importante aclarar que las alternativas presentadas son el resultado del análisis de una serie de alternativas y de entre ellas las que mejores resultados presentaron en condiciones de flujo y mínimas inversiones en las modificaciones del sistema actual, fueron las elegidas.

## II.5a.- Alternativa No 1.

En esta alternativa se muestra el análisis de la red en el momento en que la refinería de Salamanca presenta un aumento en su capacidad de refinación del orden de un 40 y un 60%, es tanto que las refinerías de Tula y Ascapotzalco mantuvieron su capacidad.

Para la primera de estas condiciones la tubería de 24 pg manejaría el gasto total transportado actualmente, tanto para Salamanca como para Tula y Ascapotzalco; la tubería de 18 pg -- transportaría todo el incremento para satisfacer la demanda en Salamanca.

Las modificaciones necesarias para manejar esta alternativa fueron:<sup>s</sup>

Para un aumento en el 40%.

1) Aumento en la potencia de bombeo para las estaciones 1N, 2N, 3N, 4N, 4N', y 5N (tabla 7).

ii) Disminución en la potencia de bombeo para las estaciones 2E, 3E, 4E, 5E, y 6E (tabla 7).

---

\* Todas las comparaciones están relacionadas con el ajuste

Para un aumento de un 60%.

i) Las estaciones 1N, 2N, 3N, 4N, y 5N aumentarón su potencia de bombeo. (tabla 7).

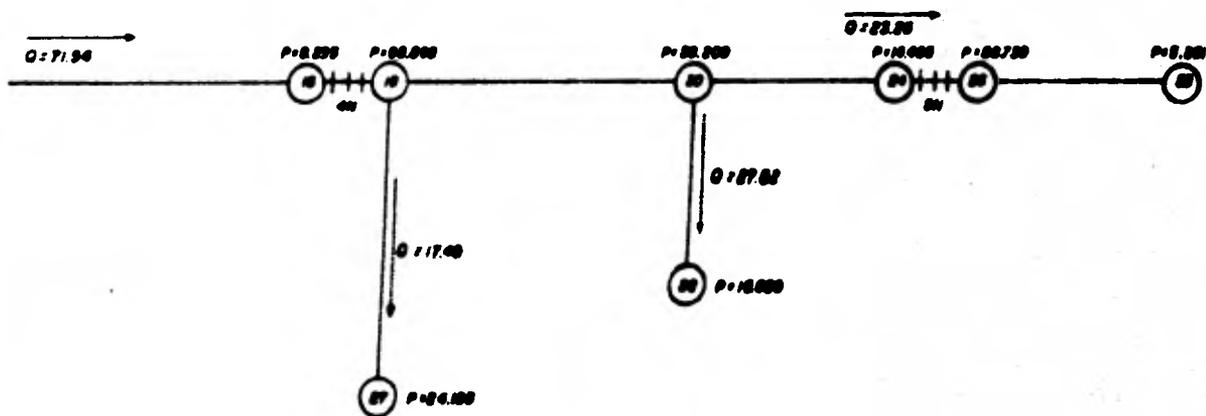
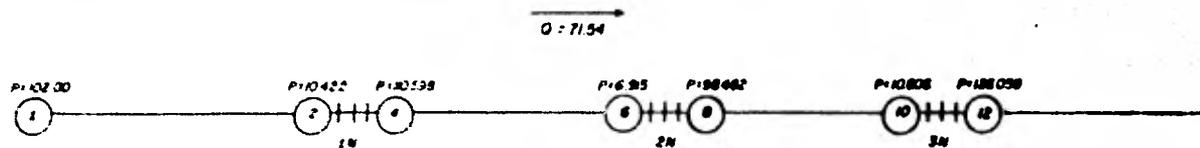
ii) Aumento de potencia de bombeo en las estaciones 6E, 4N', y 5N' .

iii) Colocación de una tubería paralela de 14 pg entre los nodos 35 y 28, debido a que la capacidad del conector no fue suficiente.

Toda la información concerniente a presiones y gastos de esta alternativa se presentan en las figuras 9, 10 y 11.

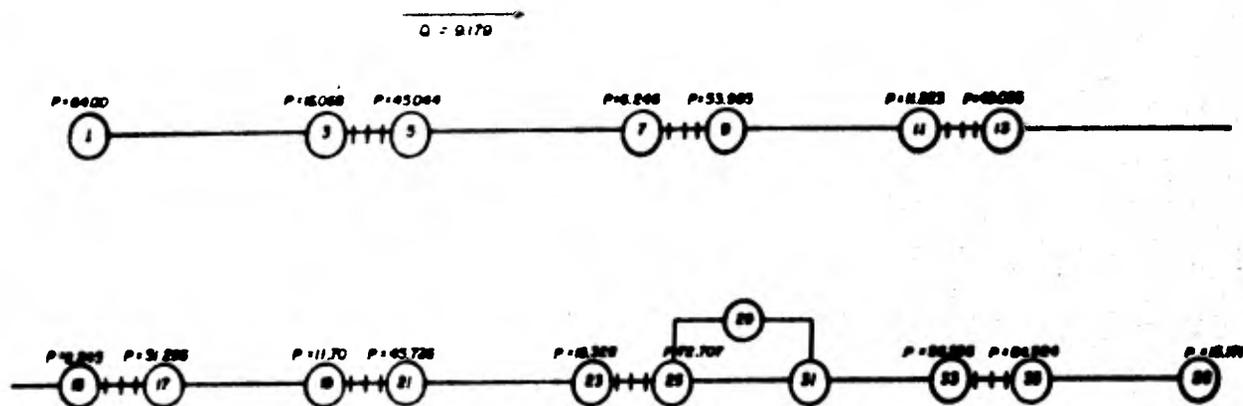
Se observa que se incrementa la presión en los nodos en comparación con el ajuste, pero en ninguno de los casos sobrepasa la presión de prueba. En lo referente a los gastos manejados, se observa que las tuberías pueden operar mayor capacidad de transporte manejándose por separado que en conjunto, esto se debe principalmente a que la tubería de 24 pg soporta mayores presiones que la de 18 pg, lo cual puede confirmarse con el hecho que la tubería de 24 pg puede transportar, con mayores presiones, el volumen que manejaban ambas, quedando disponible la tubería de 18 pg para cu-

brir otras demandas (fig. 10 y 11). En general, en esta forma el sistema puede incrementar hasta un 20% los volúmenes de aceite —  
manejados.



Q (m<sup>3</sup>/s)  
 P (kg/cm<sup>2</sup>)

ALTERNATIVA No. 1.	
TUBERIA DE 34"	
TECN. PROFESIONAL	FIG. 9
ABRAMO GARCÍA JIMÉNEZ	

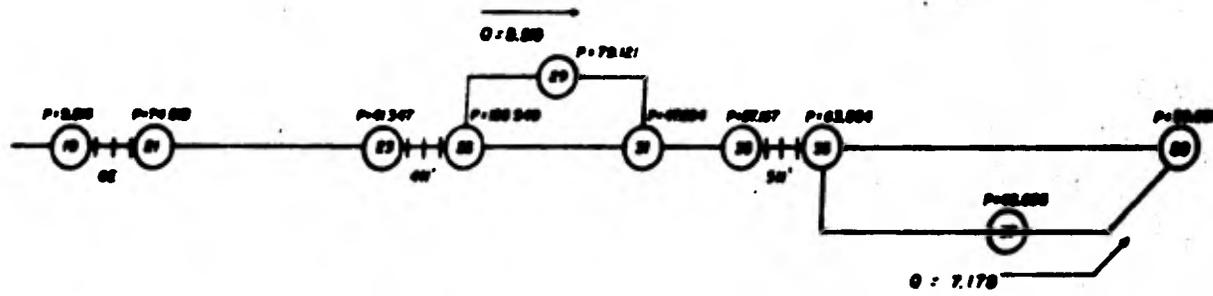
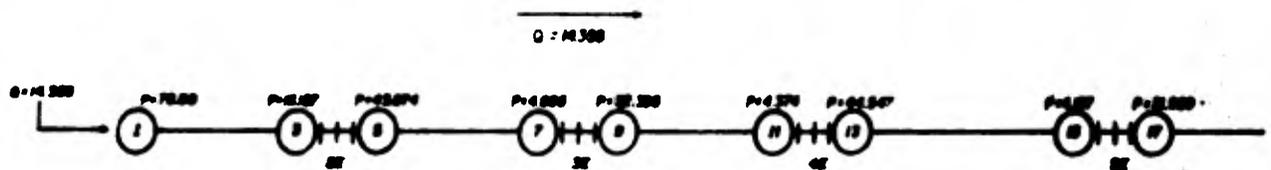


$Q$  (  $m^3/s$  )  
 $P$  (  $kg/cm^2$  )

TUBERIA 18" INCREMENTO DE 40%.  
 ALTERNATIVA 1A. EN SALAMANCA.

TECNICO PROFESIONAL  
 ABRAHAM BRUCEZ JUAREZ

FIG. 10



$Q$  ( $m^3/seg$ )  
 $P$  ( $kg/cm^2$ )

TUBERIA DE 10"	INCREMENTO DE 60°A
ALTERNATIVA No. 10	EN SALAMANCA
TECN. PROPRIETARIA	
ABRAMO GÓMEZ JIMÉNEZ	FIG. N

### Alternativa No 2.

En esta segunda posibilidad se supuso el incremento de refinación en Azcapotzalco del orden de aproximadamente 52% y se mantuvieron ahora las refineries de Salamanca y Tula con su capacidad original.

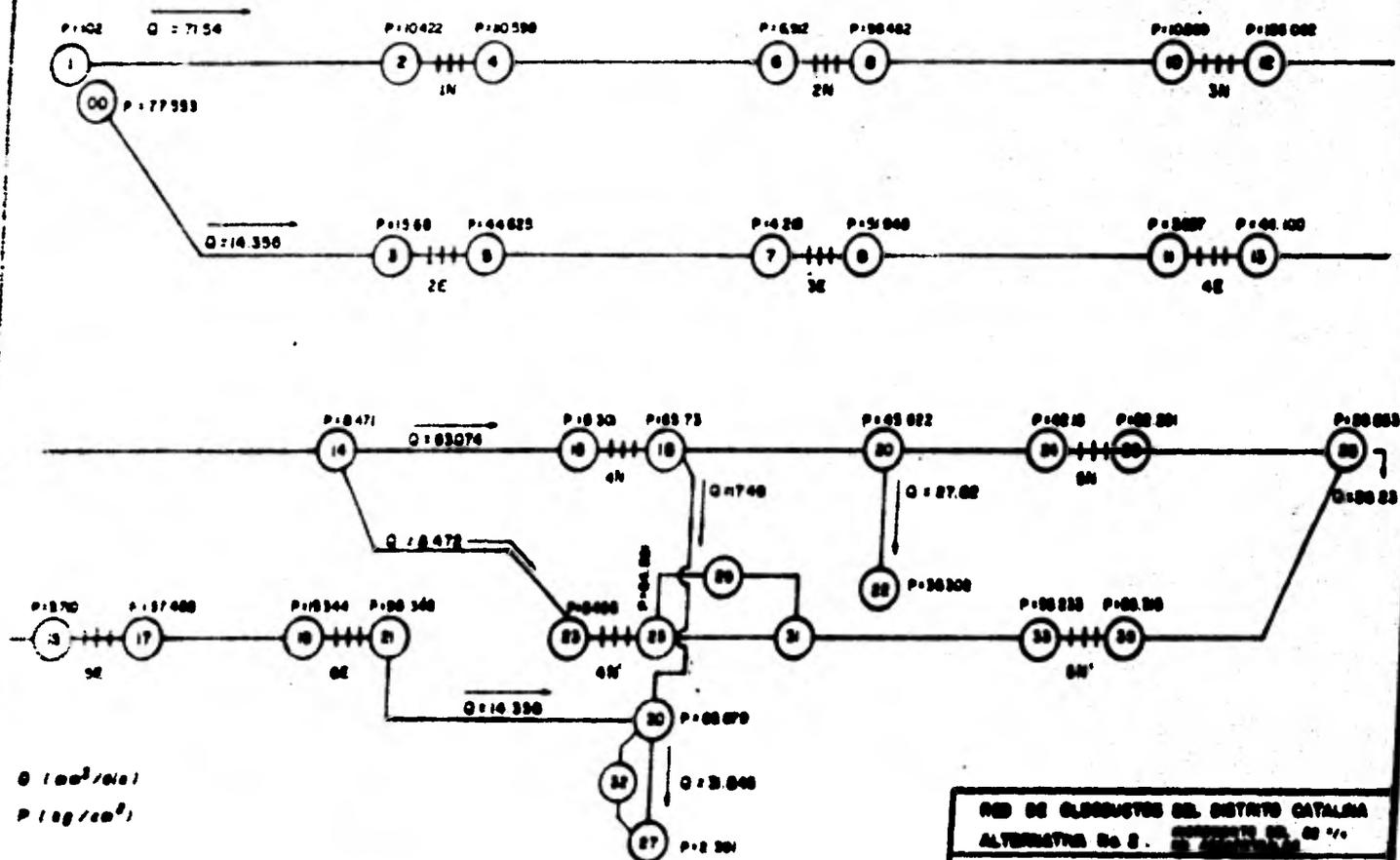
Para esta segunda alternativa la tubería de 24 pg transportó el mismo volumen que en la primera hasta el nodo 14, — donde al igual que en su forma original se conectó a la tubería de 18 pg, con esto la tubería de 24 pg logró satisfacer la demanda original en Azcapotzalco, mientras que el incremento sería manejado por la tubería de 18 pg que se conecto al ducto que va hacia la refinería a partir del nodo 18. Finalmente ambas tuberías manejarán a partir de los nodos 18 y 25 el aceite requerido por Tula y Salamanca.

### Modificaciones requeridas.

1) Fue necesario utilizar una tubería paralela a la que va de los nodos 18 a 27, el diámetro de esta fue de 14 pg y su longitud igual que la anterior.

ii) Con esto las potencias instaladas en las estaciones de bombeo para la tubería de 24 pg hasta la estación 3N, -- fueron las mismas que en la primera alternativa, la 4N disminuyó su potencia y la 5N tuvo la misma del ajuste; para la tubería de 18 pg en todas las estaciones fue la misma del ajuste, salvo la estación 6E que requirió de una mayor potencia. (tab. 7 y fig. 12).

En la figura 12 se observa un incremento en las presiones de los nodos, pero siempre menores que las de prueba; respecto a los gastos, esta alternativa presenta la factibilidad de proporcionar más aceite a la refinería de Ascapotzalco, pero manteniendo el mismo incremento general de la alternativa N° 1, lo importante es hacer notar que es posible hacer combinaciones en el sistema para satisfacer la demanda en diferentes puntos de acuerdo a las necesidades. Si este incremento general de 20% se pretende efectuar en las condiciones actuales, las presiones necesarias sobrepasarían las máximas de prueba.



$Q$  (m<sup>3</sup>/s)  
 $P$  (kg/cm<sup>2</sup>)

RED DE CONDUCTOS DEL DISTRITO CATALA  
 ALTERNATIVA No 2.  
 TERCERA PROPOSICION  
 ABRIL 1962

Tab. 7.- TABLA COMPARATIVA DE LAS POTENCIAS EMPLEADAS.

ESTACIONES	POTENCIA NOMINAL EN OPERACION (HP)	*POTENCIA DISPONIBLE SOBRE EL FLUIDO (HP)	POTENCIA EFECTIVA SOBRE EL FLUIDO*			
			AJUSTE	ALTER. #1	ALTER. #2	ALTER. #3
				40%	60	
1B	15 490	11 772	8 043	10 655	10 555	10 595
2B	15 490	11 772	6 439	9 950	9 950	9 950
3B	15 490	11 772	8 767	12 524	12 524	12 524
4B	2 800	2 128	1 995	6 232	6 232	6 232
5B	1 200	1 080	2 960	2 960	2 960	1 070
2E	1 400	1 064	632	404	632	632
3E	1 400	1 064	1 049	666	1 041	1 041
4E	1 400	1 064	876	528	876	876
5E	1 400	1 064	1 042	559	1 043	1 043
6E	1 400	1 390	1 390	475	1 470	1 470
4B*	300	726	726	300	1 400	726
5B*	400	400	400	400	300	470

Se considera que la diferencia existente entre las columnas 3 y 4 de esta tabla se debe principalmente a estos aspectos:

- i) Baja eficiencia de operación, en la actualidad.
- ii) Información defectuosa acerca de las potencias reales.

\* Potencia nominal afectada por los factores de eficiencia.

### III.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, la red estudiada presenta condiciones de flujo de capacidad máxima; es decir, cualquier incremento en el volumen transportado, generaría presiones que no se pueden obtener con las instalaciones actuales, además de sobrepasar las presiones de prueba del sistema.

De presentarse la necesidad de un incremento en la demanda de aceite en la región central del país, esta no podrá ser satisfecha con el sistema actual, ya que este requerirá modificaciones y ampliaciones.

La información utilizada en este estudio, sobre todo las condiciones de flujo, en ocasiones es difícil de obtener en forma adecuada. Se observó durante el desarrollo de este trabajo - que alguna información no era lógica, tal vez por no haberse tomado adecuadamente ó porque pertenecía a un fenómeno de flujo no considerado; además existe información que generalmente no es obtenida por considerarse no necesaria. Por tales motivos se recomienda que exista un programa de obtención de información que permita simular automáticamente el comportamiento de flujo en los sistemas de transporte y así poder recomendar condiciones óptimas de operación.

La utilización de un modelo matemático en el análisis de un sistema de transporte de aceite por tuberías, permite en forma eficiente estudiar una gran cantidad de alternativas de operación, a sí como poder diseñar las ampliaciones al sistema correspondiente.

## NOMENCLATURA

•API	Densidad
C	Constante
°C	Temperatura en grados centigrados
d	Diámetro interior
E	Eficiencia
	Factor de fricción
$\epsilon_c$	Factor de conversión de la segunda ley de Newton
HP	Potencia en horse power
L	Longitud
m	Masa
$N_{Re}$	Número de Reynolds
P	Presión
$P_s$	Presión de succión
$P_d$	Presión de descarga
Q	Gasto
q	Energía calorífica
S	Entropía
T	Temperatura
U	Energía interna

$V$	Volumen
$v$	Velocidad.
$W_s$	Trabajo realizado sobre el fluido
$W_f$	Pérdida de energía por fricción
$Z$	Elevación
$\rho$	Densidad
$\mu$	Viscosidad
$\epsilon$	Rugosidad

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Sánchez Arredondo F.: "Cálculo de capacidades de transporte en oleoductos y gasoductos"; Instituto Mexicano del Petróleo. - 1981.
- 2.- Acuña R. A., Limón H. T., Garaicochea P. F.: "Flujo multifásico en tuberías."; Instituto Mexicano del Petróleo, Publicación N° 80BM/287, Septiembre 1977.
- 3.- Rana V. Giles.: "Mecánica de los fluidos e hidráulica.". Mc Graw Hill, 5<sup>ta</sup> edición, 1970.
- 4.- Brill James P. Dr., Beggs H. Dale. Dr.: "Two phase flow in pipes."; 3<sup>ra</sup> edición, Abril 1979.
- 5.- Lozano V. E.: "Apuntes de medición y transporte de hidrocarburos."; U.N.A.M., Facultad de Ingeniería, 1977.
- 6.- M. A. Stoner.: "A new way to design natural gas systems."; Pipe Line Industry, Febrero 1970.
- 7.- Sánchez Arredondo F.: "Estudio de factibilidad de centralización de las estaciones de compresión y separación de gas en el Distrito Poza Rica."; Instituto Mexicano del Petróleo. 1980.
- 8.- Limón H. T.: "Transporte de gas en régimen permanente."; Instituto Mexicano del Petróleo, Publicación N° 74BM/164, Julio 1974.

- 9.- Kermit. E. Brown.: "Gas lift theory and practice."; Prentice - Hall, Inc., Englewood cliffs, New Jersey. 1967.
- 10.- Victor L. Streeter.: "Mecánica de los Fluidos.", Mc Graw Hill 4<sup>ta</sup> edición 1971.
- 12.- Campbell John M. Dr.: "Gas conditioning and processing." 2<sup>da</sup> edición 1968.
- 13.- N. N. Chernov.: "Máquinas herramientas para metales."; Editorial MIR, Moscú 1974.

