

22j



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO Y ANALISIS DE REDES DE GAS EN REGIMEN PERMANENTE. PROGRAMACION ORIENTADA A OBJETOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO PETROLERO PRESENTA: MARGARITA BECERRA GONZALEZ

DIRECTOR DE TESIS: M. en I. NESTOR MARTINEZ ROMERO



MEXICO, D. F.

1998

265290

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-069

**SRITA. MARGARITA BECERRA GONZALEZ**  
**Presente**

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

**DISEÑO Y ANALISIS DE REDES DE GAS EN REGIMEN PERMANENTE. PROGRAMACION  
ORIENTADA A OBJETOS**

	<b>RESUMEN</b>
<b>I</b>	<b>INTRODUCCION</b>
<b>II</b>	<b>CONCEPTOS Y ECUACIONES BASICAS</b>
<b>III</b>	<b>CONCEPTOS DE LA PROGRAMACION ORIENTADA A OBJETOS</b>
<b>IV</b>	<b>DESARROLLO DEL PROGRAMA DE COMPUTO</b>
<b>V</b>	<b>APLICACIONES DE CAMPO</b>
<b>VI</b>	<b>CONCLUSIONES</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>
	<b>APENDICES</b>

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 17 de septiembre de 1996  
EL DIRECTOR

  
ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS\*RI\*LR\*gtg.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE INGENIERÍA

### DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

#### DISEÑO Y ANÁLISIS DE REDES DE GAS EN RÉGIMEN PERMANENTE. PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS.

POR:

**MARGARITA BECERRA GONZÁLEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**M. EN I. NÉSTOR MARTÍNEZ ROMERO**

**JURADO:**

PRESIDENTE: M. EN I. JOSÉ ÁNGEL GÓMEZ CABRERA

VOCAL: M. EN I. NÉSTOR MARTÍNEZ ROMERO

SECRETARIO: M. EN C. ANDRES TEJERO ANDRADE

1ER. SPTE.: M. EN I. MAXIMINO MEZA MEZA

2DO. SPTE.: DRA. JETZABETH RAMÍREZ SABAG

MEXICO, D.F., CD. UNIVERSITARIA, AGOSTO DE 1998.

---

---

## **AGRADECIMIENTOS**

**A MIS PADRES ALEJANDRO Y MARGARITA, por darme lo mejor de sus vidas.**

**A MIS HERMANOS ALEJANDRO, MARIBEL Y ALBERTO, por compartir los momentos más significativos en la tristeza y la alegría.**

**A MI TÍO ENRIQUE , por sus valiosos consejos.**

**A todos mis primos, quienes me dieron la fuerza para seguir adelante.**

**A todos mis amigos, quienes me apoyaron incondicionalmente.**

**A mis queridos amigos ZORAIDA, EDGAR, CARLOS, ESTHER, CARMELITA Y ANGELES, por su gran comprensión y apoyo.**

**A mi querido amigo RAFAEL LASTRA, por su gran ayuda en los momentos más difíciles de mi vida.**

**A RAFAEL CRUZ, por su gran comprensión y amor incondicional.**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la gran oportunidad de desarrollarme académicamente.**

**A la Facultad de Ingeniería, por mostrarme la parte positiva de la vida.**

**A Néstor Martínez, José A. Gómez y Andrés Tejero, por su gran entrega profesional y humana que me permitieron alcanzar importantes metas en esta etapa de cambios personales y por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.**

**A los Ingenieros Ana Bertha González M. y Francisco Sánchez Arredondo por su valiosa asesoría para la realización de este trabajo.**

---

## ÍNDICE

	Página.
RESUMEN.	i
I. INTRODUCCIÓN.	1
II. CONCEPTOS Y ECUACIONES BÁSICAS.	17
II.1. Formulación del Modelo Matemático.	18
II.2. Solución del Sistema de Ecuaciones con el Método de Gradiente Conjugado.	22
II.3. Problemas Numéricos.	35
III. CONCEPTOS DE LA PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS.	38
III.1. Comprensión de la terminología de Visual Basic.	38
III.2. Utilización del Ambiente de Trabajo Visual Basic.	40
IV. DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CÓMPUTO.	41
V. APLICACIONES DE CAMPO.	56
V.1. Ejemplo.	56
V.2. Campo "Las Margaritas".	60
V.3. Campo "Tomas".	64
V.4. Ejemplo "Compresor".	74
VI. CONCLUSIONES.	80
NOMENCLATURA.	82
BIBLIOGRAFÍA.	83

---

---

**TABLAS:**

Tabla I.1. Resumen de los Proyectos en México sobre Tendido de Tuberías.	2
Tabla II.2.1. Máximos de la Función II.2.1.	25
Tabla V.1.1. Valores Iniciales para el Ejemplo de 6 Nodos.	58
Tabla V.1.2. Resultados del Simulador para el Ejemplo de 6 Nodos.	58
Tabla V.1.3. Resultados del Simulador para el Ejemplo de 6 Nodos eliminando la tubería que va del Nodo 3 al 4.	59
Tabla V.2.1. Valores Iniciales para el Campo "Las Margaritas".	62
Tabla V.2.1. Resultados del Simulador para el Campo "Las Margaritas".	63
Tabla V.3.1. Valores Iniciales para el Campo "Tomas".	68
Tabla V.3.2. Resultados del Simulador para el Campo "Tomas".	69
Tabla V.3.2. Resultados del Simulador para el Campo "Tomas" Cambiando el Valor de algunos Diámetros.	71
Tabla V.4.1. Valores Iniciales para el Ejemplo "Compresor".	74
Tabla V.4.2. Resultados del Simulador para el Ejemplo "Compresor".	75

**FIGURAS:**

Figura I.1. Historia de la producción de Crudo y Gas en México 1938-1994.	4
Figura I.2. Contribución del Gas no Asociado a la Producción Total de Gas del País Cifras en Millones de Pies Cúbicos por Día.	6

---

---

Figura I.3. Red de Gasoductos.	8
Figura I.4. Pozos Exploratorios Perforados 1938-1982.	10
Figura I.5. Pozos Exploratorios Perforados 1983-1994.	11
Figura I.6. Reservas de Gas Seco 1983-1995.	15
Figura II.1.1. Ciclo de Compresión para un Proceso Adiabático.	19
Figura II.2.1. Superficie en un espacio de tres dimensiones.	23
Figura II.2.2. Contorno de Curvas de Nivel de la Superficie de la Figura II.1.1.	24
Figura II.2.3. Aproximación de un Máximo de la Figura II.2.1. por una Ecuación Cuadrática.	26
Figura II.2.4. Diagrama de Bloques del Método de Gradientes Conjugados.	31
Figura II.2.5. Diagrama de Bloques del Procedimiento de Cálculo.	34
Figura II.3.1. Ejemplo para un Sistema de 6 Nodos.	35
Figura II.3.2. Diámetros y Longitudes para el Sistema de 6 Nodos.	36
Figura II.3.2. Matriz Rala con la información de Diámetros y Longitudes para el Sistema de 6 Nodos.	36
Figura V.1.1. Distribución de Diámetros y Longitudes de la Red de 6 Nodos.	57
Figura V.1.2. Distribución de Presiones y Gastos en la Red de 6 Nodos.	57
Figura V.2.1. Distribución de Diámetros y Longitudes del Campo "Las Margaritas".	60
Figura V.2.2. Distribución de Gastos y Presiones del Campo "Las Margaritas".	61

---



---

Figura V.3.1. Distribución de Diámetros y Longitudes del Campo "Tomas".	65
Figura V.3.2. Distribución de Presiones del Campo "Tomas".	66
Figura V.3.3. Distribución de Gastos del Campo "Tomas".	67
Figura V.3.4. Cambio de Diámetros del Campo "Tomas".	73
Figura V.4.1. Representación con Nodos de la Red "Compresor".	78
Figura V.4.2. Distribución de Diámetros y Longitudes de la Red "Compresor".	79
Figura A-1. Aproximación de la Relación de Capacidad Calorífica en Hidrocarburos Gaseosos.	87
APÉNDICES.	85

---

## RESUMEN

La demanda de gas en México se ha incrementado en las últimas décadas y se espera un crecimiento mayor para el futuro; las líneas de tuberías y los requerimientos de compresión para servir al mercado interno tienen un costo que excede los 2 billones de dólares, de acuerdo con las estimaciones de PEMEX.

Este trabajo está enfocado al desarrollo de un simulador para el análisis y diseño de redes que transportan gas en régimen permanente, con el fin de optimizar su diseño. El simulador permite calcular las presiones y gastos obtenidos bajo las condiciones actuales, con un tiempo de solución más rápido y con una excelente resolución, y ofrece la predicción en caso de cambios en algún componente de la red, mismo que se reflejará en la reducción o aumento de pérdidas de energía y por lo tanto en los costos.

Las técnicas de solución publicadas para el problema de transporte de gas en régimen permanente, consideran el método de Newton Raphson, el cual tiene la desventaja de requerir a priori una aproximación adecuada para evitar divergencias, por esta razón, el programa "GASNET" considera el método de Gradientes Conjugados ; el cual incrementa el radio de convergencia, acelera el proceso de cálculo y la exactitud en los resultados.

Además, una gran ventaja que proporciona dicho simulador, es la facilidad de acceso al sistema debido a la programación orientada a objetos, ya que por una parte permite a los usuarios transitar fácilmente siguiendo una trayectoria lógica, intuitiva y no lineal marcada con indicaciones claras por medio de gráficos y breves indicaciones escritas, y por otro lado el programador realiza cualquier aplicación dinámica en un tiempo relativamente corto, estableciendo aplicaciones Windows a través del lenguaje Visual Basic.

La tesis esta organizada de la siguiente forma:

- I. **Introducción:** Establecimiento de la importancia del tema, así como el porqué de su realización.
  - II. **Conceptos y Ecuaciones Básicas:** Definición de los términos y ecuaciones útiles para la base teórica y matemática del proyecto.
  - III. **Conceptos de la Programación Orientada a Objetos:** Introducción al lenguaje *Visual Basic* enfocado a la terminología de la programación orientada a objetos.
  - IV. **Desarrollo del Programa de Cómputo:** Descripción de las características, requerimientos y el diagrama del sistema GASNET.
  - V. **Aplicaciones de Campo:** Realización del estudio de redes de gas en régimen permanente con datos reales por medio de la aplicación del simulador.
  - VI. **Conclusiones:** Análisis de los resultados derivados del capítulo anterior, así como de los aspectos más importantes de la tesis.
- Bibliografía:** Referencias de las fuentes de información del proyecto.
- Apéndices:** Exposiciones breves y gráficas para complementar algunos de los puntos expuestos en el trabajo.

## I. INTRODUCCIÓN

La construcción de redes para transporte de gas se ha incrementado de forma moderada desde 1993 y se espera un fuerte desarrollo a lo largo de los 90's con el impulso de la actividad del gas natural.

Fuera de los E.U.A. y Canada, se estima que la construcción durante los próximos tres años de 54, 313 Km. de líneas de tubería para transportar gas natural, aceite crudo y productos refinados tendrá un costo que podría fácilmente exceder los \$34 billones de dólares\*. Este total incluye aproximadamente 35,565 Km. de sistemas de transmisiones de gas.

Actualmente y a futuro en México y Centro América, la actividad en este rubro ha sido mínima en lo que se refiere a nuevas líneas. En PEMEX se estudia la posibilidad de una construcción adicional para importar y exportar gas, la cual podrá realizarse por PEMEX y varias empresas extranjeras asociadas.

A partir de 1993 el transporte de gas natural en México representa 563 Km. de ductos de tuberías nuevas y no hay aumento de almacenamiento del mismo.

El principal mercado de exportación de gas en México, en el último lustro es, sólo la frontera norte, particularmente atravesando desde California. Por otro lado, el país tiene reservas de gas localizadas en el sur para satisfacer la demanda que se encuentra en el norte. Las redes de tubería y los requerimientos de compresión para servir al mercado interno tiene un costo que excede los 2 billones de dólares, de acuerdo con las estimaciones de PEMEX.

Los últimos proyectos en México sobre trabajos en tendido de tuberías, se muestran a continuación:

---

\*Pipe Line Industry, Nov 93,94 y 95

Tabla I.1.

## AÑO 1993

ORIGEN	DESTINO	FLUIDO	LONGITUD (Km.)	DIÁMETRO(Pg.)
San Pablo	Cuemanco	Gas	39	24
Salamanca	Tula	Productos	241	16
Palmillas	Toluca	Gas	125	16
Minatitlán	Salina Cruz	Productos	250	12
Atasta	Cd. Pemex	Productos	104	16
Venta de Carpio	Tula	Crudo	24	24
		Productos	22	14

## AÑO 1994

ORIGEN	DESTINO	FLUIDO	LONGITUD (Km.)	DIÁMETRO(Pg.)
Minatitlán	Pajaritos	Productos	32	14
Venta de Carpio	Cuemanco	Gas	69	24
Salamanca	Tula	Productos	239	16
Tula, Palmillas	Toluca	Productos	227	16
Pol - A	Abkatun	Aceite	10	24
Catedral	Muspac	Aceite	6	12
Muspac	Batería	Aceite	13	16
	Chiapas			
Minatitlán	Salina Cruz	Productos	231	12
Atasta	Cd. Pemex	Productos	104	16

## AÑO 1995

ORIGEN	DESTINO	FLUIDO	LONGITUD (Km.)	DIÁMETRO(Pg.)
Catedral	Muspac	Aceite	7	12
Muspac	Batería	Aceite	12	16
	Chiapas			
Pijje	Oaxaca	Gas	42	8
Nuevo Teapa	Tuzandepetl	Gas	11	24
Palmillas	Toluca	Gas	122	16

Con la finalidad de presentar al lector una visión más clara del desarrollo del Gas en México, a continuación se transcribirá en su gran mayoría, la ponencia del Ing. Daniel Nájera en el seno de la Asociación de Ingenieros Petroleros de México.

## AYER, HOY Y MAÑANA DEL TRANSPORTE DE GAS NATURAL EN MÉXICO.

En 1945, el descubrimiento del yacimiento Misión en el norte del país, da inicio de cierta manera a la historia del gas natural en México. Desde aquel entonces, las dificultades que afrontó Petróleos Mexicanos para desarrollar las actividades ligadas al aprovechamiento del gas, son las que normalmente se dan en este tipo de industria incipiente, a saber: La construcción de sistemas de transporte para ligar la producción con el consumo, y el establecimiento de mercados. Este tipo de problemas, más bien de índole económica y de inversión que de orden técnico, se debieron a que la producción y el aprovechamiento del gas natural adquiriera en México, una importancia relativamente tardía, como fuente de suministro energético, tomando en cuenta el auge temprano de la explotación del crudo.

A fines de los cuarenta no se comercializaba el gas natural. Las líneas de conducción de pequeñas longitudes y diámetros sólo se utilizaban para abastecer a las propias instalaciones de Pemex, sin embargo existían gasoductos de propiedad privada cuya extensión cercana a los 300 km. unían la frontera sur de Estados Unidos con la ciudad de Monterrey, alimentados con gas importado. Enfrentábamos en esa época la incongruencia de contar con el recurso, de tener una demanda del mismo, y sin embargo de no poder satisfacer ésta con aquél. Nuestros usuarios eran dependientes del exterior en este aspecto.

Consciente de esa desafortunada e inconveniente circunstancia, Petróleos Mexicanos decide construir, en el año de 1950, el primer gasoducto de su propiedad, con una longitud de 250 km. y diámetro de 20 "; su objetivo: aprovechar el gas producido en Poza Rica y abastecer la demanda de la industria creciente del altiplano del Valle de México.

A partir de entonces y, como consecuencia de la reinversión de las utilidades generadas por la propia empresa, la situación comenzó a cambiar en forma significativa, principalmente en los años cincuenta y particularmente en la década de los sesenta; la producción de gas natural entre los años de 1952 y 1974, pasa de 256 a 2046 MMPCD en correspondencia con el descubrimiento de los yacimientos de gas asociado en Reynosa, Tamps. y Ciudad Pemex, Tab.

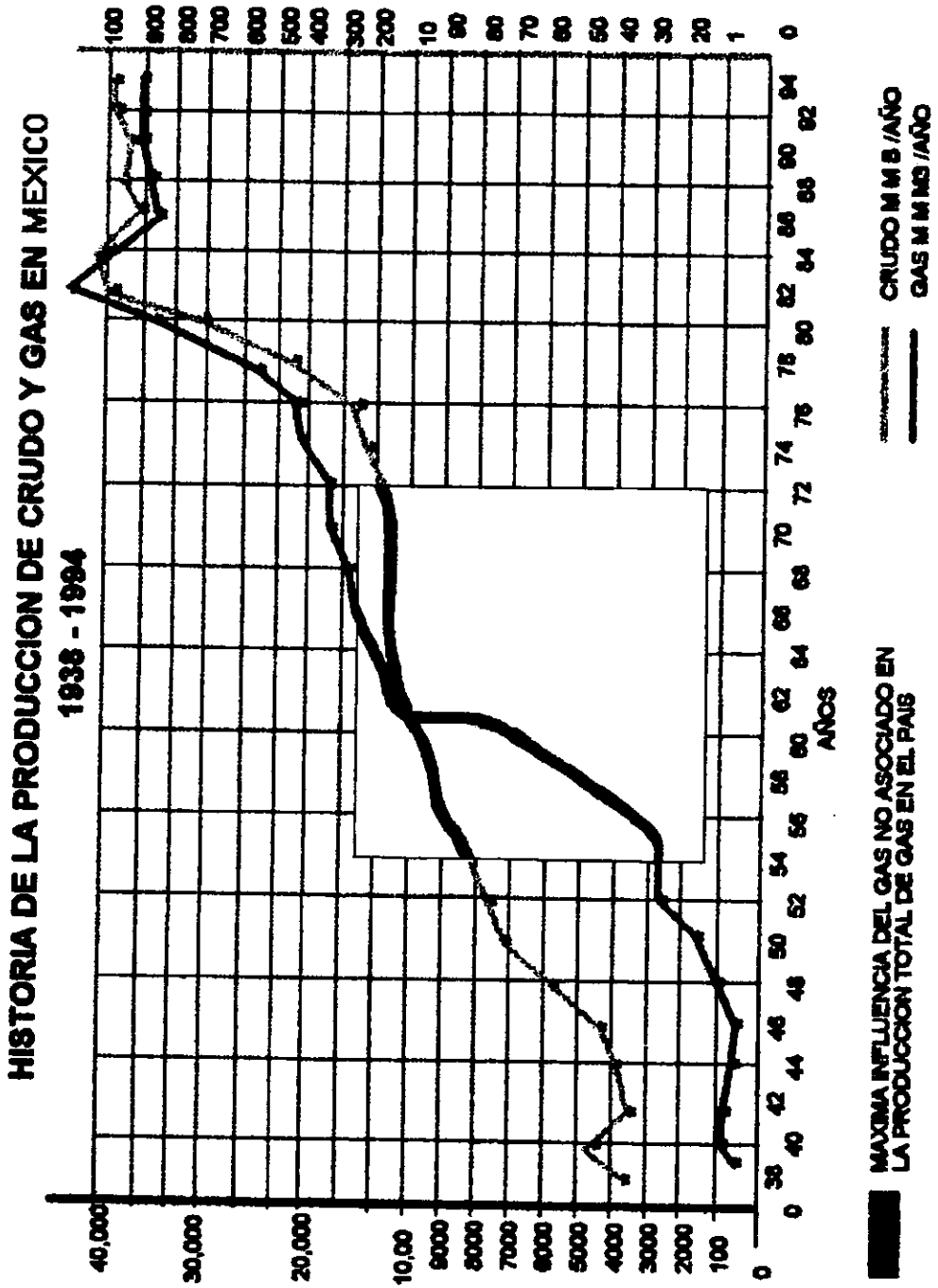


Figura I.1.

En tanto que, el incremento de la producción de gas en las décadas de los setenta y los ochenta está relacionado con el significativo aumento de la producción de crudo en Chiapas Tabasco y la Zona Marina de Campeche, cuyos pozos producen con una relación GAS-ACEITE (según el anuario estadístico de Petróleos Mexicanos de 1995) de 550 y 119 metros cúbicos de gas por cada metro cúbico de aceite, respectivamente.

Por otro lado, en la gráfica de la Figura I.2. puede apreciarse la participación de la producción del gas no asociado en la producción total de gas del país en tres épocas diferentes.

En 1965 en pleno auge de producción, los distritos Ciudad Pemex y Frontera Noroeste, aportaron 582 y 457 MMPCD, respectivamente, en tanto que la Cuenca del Papaloapan sólo contribuyó con 9 millones, para hacer un total de 1048 millones de gas no asociado, que significaron el 78 % de los 1351 producidos como promedio diario.

Ya para 1978, en pleno desarrollo de los campos de Chiapas, Tabasco, la producción de los mismos distritos productores de gas no asociado fue de 392, 531 y 31 MMPCD. para Ciudad Pemex, Reynosa y Veracruz, respectivamente, o sea 955 millones de 2561 producidos en promedio diario ese año. Ello significa que el gas no asociado representó ya sólo un 37.3 % del total producido.

La figura I.2. nos muestra que las cifras de 1994, indican que la producción del gas del país es, en la actualidad, más dependiente del gas asociado a la producción del petróleo.

Los Distritos de Ocosingo, Veracruz y Reynosa ya sólo aportaron 147, 120 y 238 MMPCD, o sea 505 de un total de 3625 millones, con lo que ahora sólo contribuyen en el 13.9 %.

Ahora bien, dentro de este proceso histórico-exitoso, se requirió una cuantiosa inversión de Petróleos Mexicanos para crear la infraestructura necesaria, sucediéndose múltiples incorporaciones de ductos para transportar la creciente oferta del gas natural y cubrir la demanda del mismo, hasta integrar una red que casi abarca toda la superficie nacional.



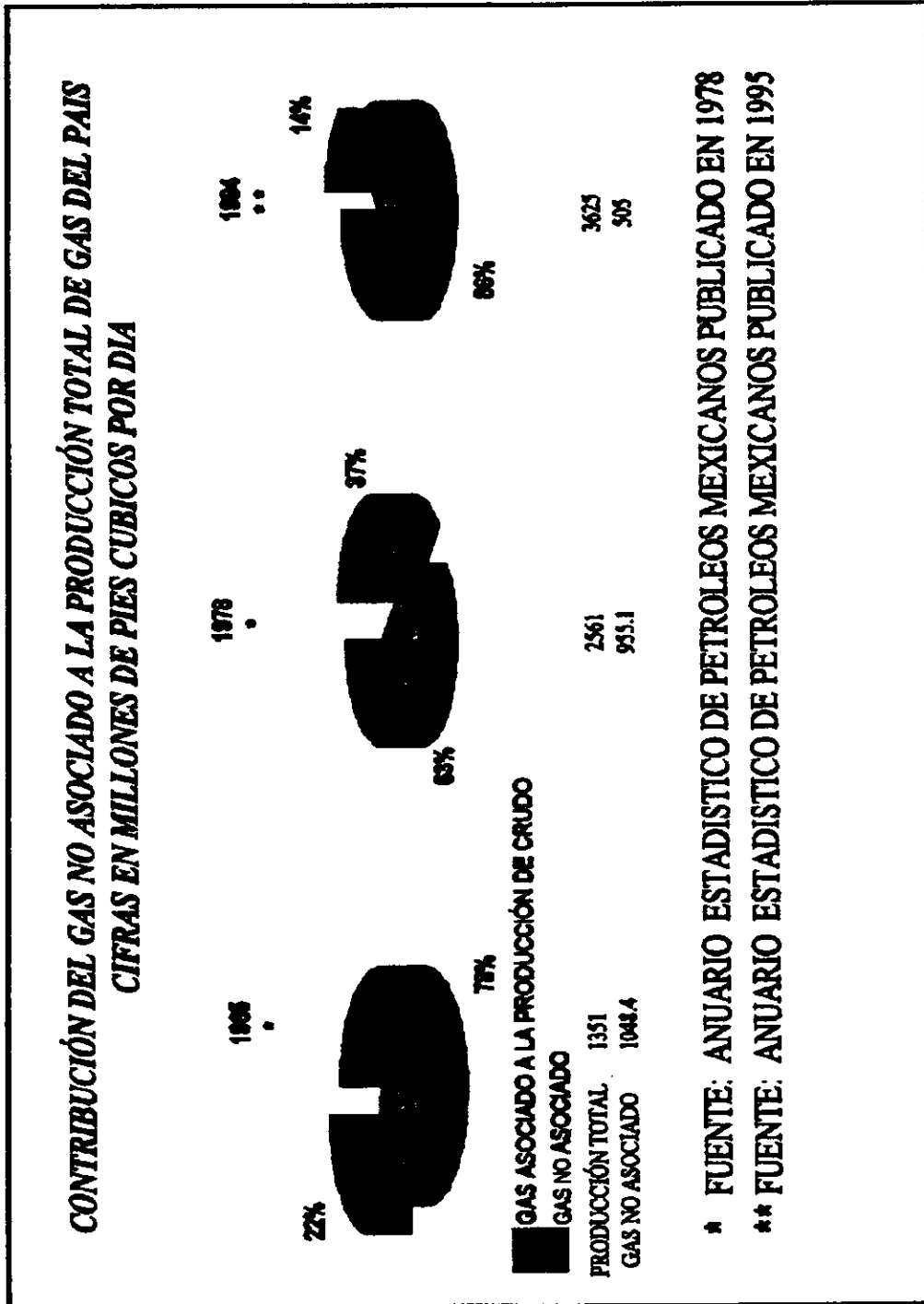


Figura 1.2.

El primer sistema se construyó para satisfacer las necesidades del norte industrial del país; Reynosa, Monterrey, Torreón, Chihuahua y Ciudad Juárez. Luego vinieron los gasoductos necesarios para hacer llegar el gas natural, producto de los campos del sureste hasta las zonas industriales del centro y del occidente, y más recientemente en 1979, el controvertido gasoducto de 48 y 42 pulgadas de diámetro que une los dos sistemas anteriores, partiendo de Chiapas, hasta Tamaulipas y Nuevo León, atravesando prácticamente toda la región costera del Golfo de México, con una longitud de 1102 kilómetros.

Los beneficios derivados de estas obras realizadas 100% por personal mexicano, fueron múltiples y muy trascendentes: se creó tecnología especializada, se estimuló la industria nacional fabricante de tubería, se crearon miles de fuentes de trabajo durante el proceso de construcción, se aseguró el suministro confiable y suficiente de gas natural a nuestras zonas industriales más importantes, constituidas en el norte, en el occidente y en el altiplano central, propiciando además nuevos desarrollos industriales de importancia intermedia en los estados de Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, Veracruz y Tamaulipas.

La más reciente inversión de Petróleos Mexicanos en esta notable infraestructura, fue el gasoducto de 48" de diámetro y casi 400 km. de longitud entre Zempoala, Ver. y Santa Ana, Hgo. con importancia estratégica para mejorar la confiabilidad de suministro, al aumentar la flexibilidad en el manejo de los sistemas y su capacidad de transporte.

Este relativamente nuevo ducto, dio lugar a la creación de otros polos de desarrollo a lo largo de su recorrido por los estados de Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Estado de México e Hidalgo, favoreciendo con ello la descentralización de las actividades productivas y generando oportunidades para muchos mexicanos en sus lugares de origen.

Han transcurrido más de 5 décadas desde que se inició la operación de los primeros gasoductos propiedad de la nación mexicana, y la situación no podía haber sido diferente:

Ya no estábamos sujetos a la importación de gas natural, aprovechamos casi íntegramente en la medida que se autorizaron las inversiones, los volúmenes extraídos de los yacimientos, suministramos un combustible eficiente y limpio a industrias que así lo requieren por su naturaleza o por estar enclavadas en zonas de alta concentración urbana con rigurosas reglamentaciones de protección al medio ambiente, sentando a la vez las bases para desarrollar regiones del país en otra época marginadas.

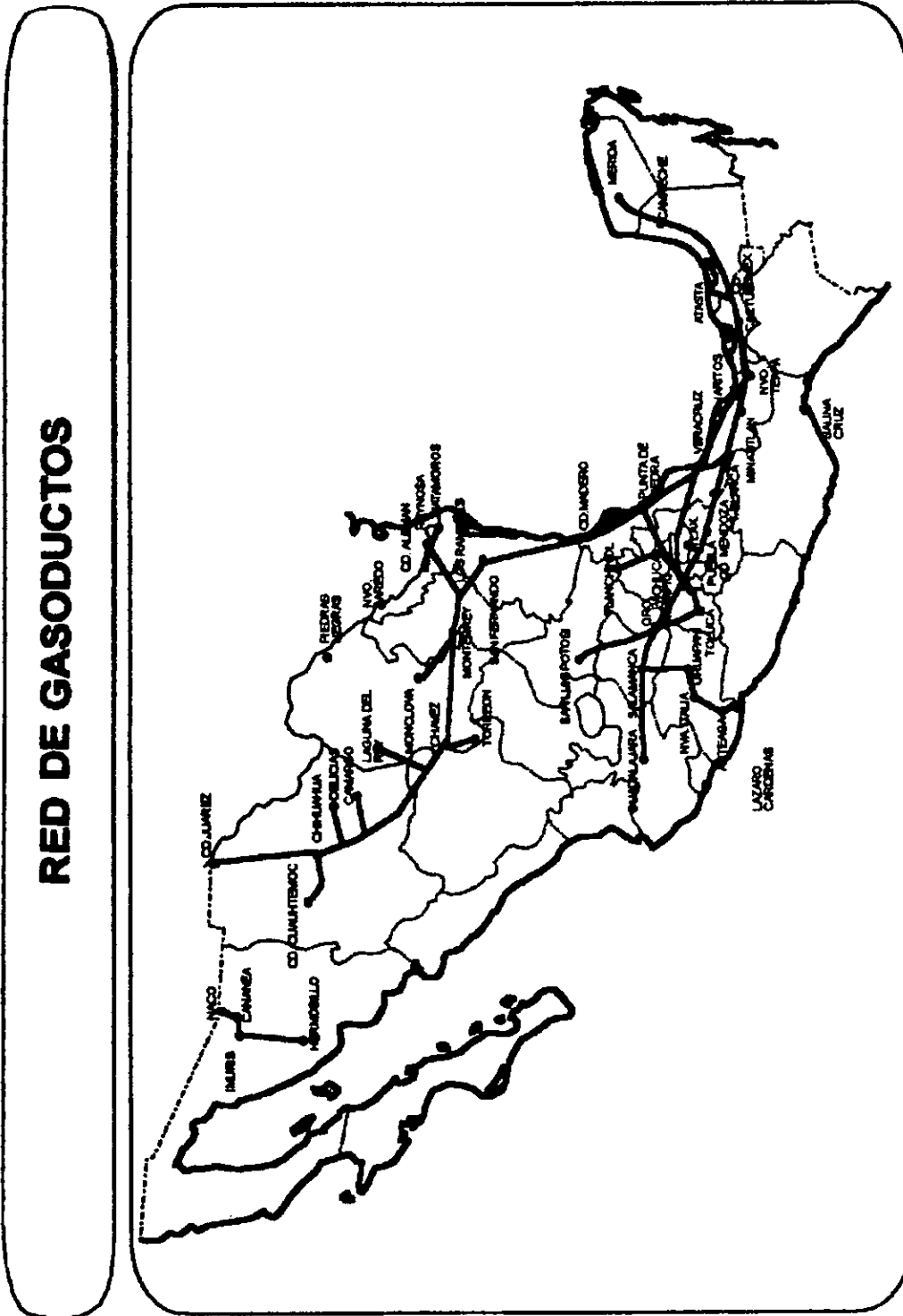


Figura 1.3.

Situémonos ahora en el presente respecto a lo acontecido en Petróleos Mexicanos y en México, en general. No podemos trazar entre el pasado y el de hoy, una línea divisoria precisa, sin embargo, tratemos de ubicarnos en la década de los ochenta y lo transcurrido de los noventa.

Hablemos de la sustancia de toda industria petrolera integrada, la perforación exploratoria.

Así pues, analicemos la gráfica de la figura 4, en la cual se muestra el número de equipos de perforación que Petróleos Mexicanos destinó a confirmar la teoría de los métodos indirectos de exploración sobre la existencia de yacimientos capaces de contener hidrocarburos explotables comercialmente. Desafortunadamente en las estadísticas que resumen la actividad de la empresa cada año, no se puede precisar qué cantidad de equipos dedicados a exploración, se destinaron a localizar nuevas provincias cuyos yacimientos contuvieran petróleo o gas o sólo gas no asociado.

Sin embargo, recordemos el cuadro asurado de la gráfica I.1. que nos indicaba el periodo de tiempo en el cual se manifestó la máxima influencia del gas no asociado en la producción total de gas del país, 1954-1972, así como que, a partir de 1976 la producción de gas se fue relacionando cada vez más a la extracción de crudo, de tal manera que en 1994 el gas no asociado sólo representó el 13.9% del total.

La gráfica de la Figura I.4., pone de manifiesto que a partir de 1976 y hasta 1982, el número de equipos dedicados a la exploración se incrementó casi en un 100%, pero que la mayor profundidad y el mayor grado de dificultad de los pozos de Chiapas, Tabasco y la Zona Marina hizo que disminuyeran tanto los kilómetros perforados como el número de pozos.

Por tanto, mediante la interpretación de ambas gráficas, podemos afirmar que la actividad exploratoria en ese lapso de tiempo para determinar nuevas provincias con posibilidad de contener gas no asociado, se dejó para el futuro.

Desafortunadamente, el anuario estadístico de Petróleos Mexicanos cambió de formato a partir de 1990, por lo que la gráfica de la Figura I.5. se compone con información contenida de los anuarios de 1988, 94 y 95 para tratar de ilustrar lo que sucedió en los últimos dos sexenios con la actividad de la perforación exploratoria.

**POZOS EXPLORATORIOS PERFORADOS  
1938 - 1982**  
**Nº DE EQUIPOS DE PERFORACIÓN DEDICADOS A EXPLORACIÓN**

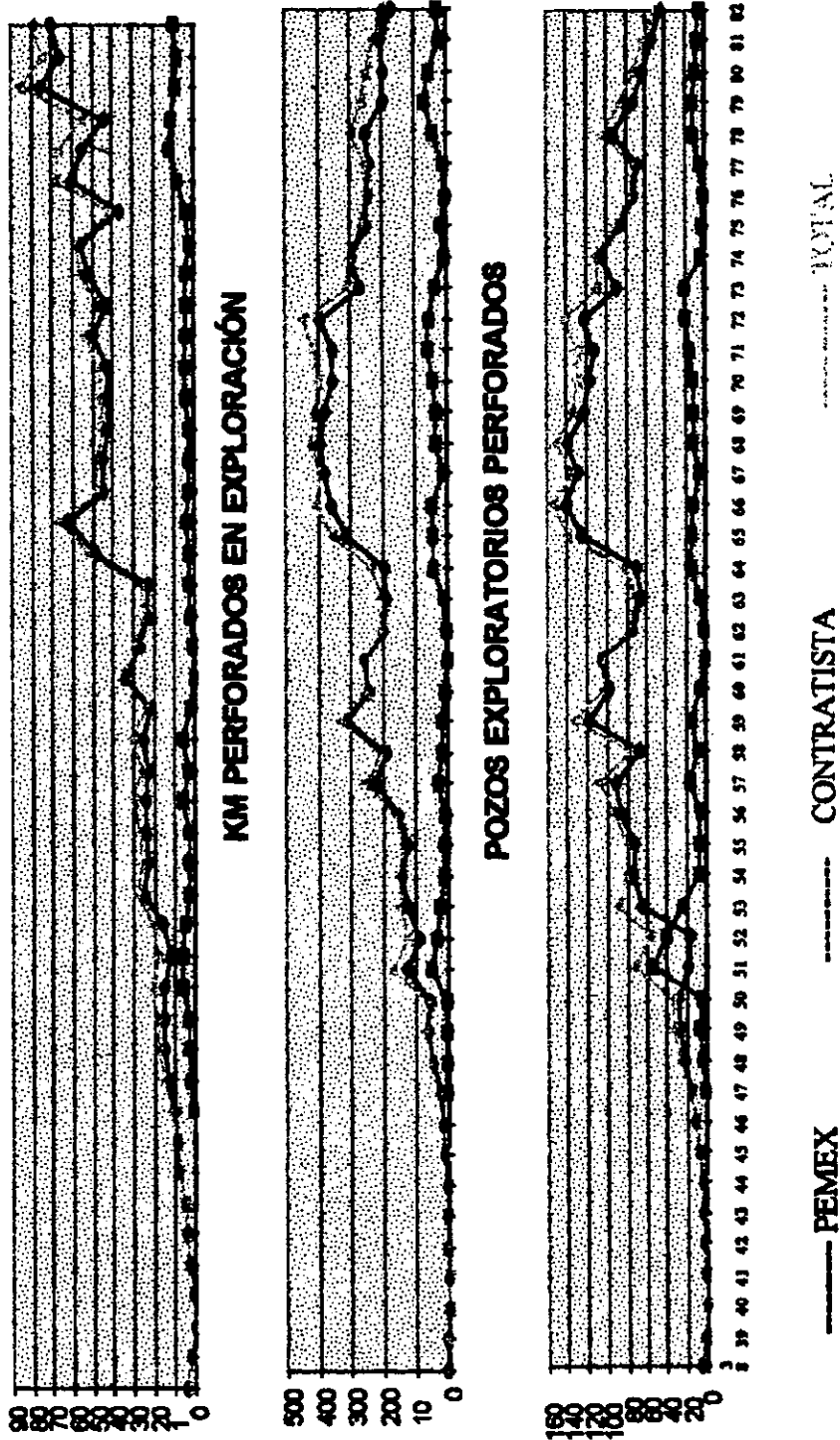


Figura 1.4.

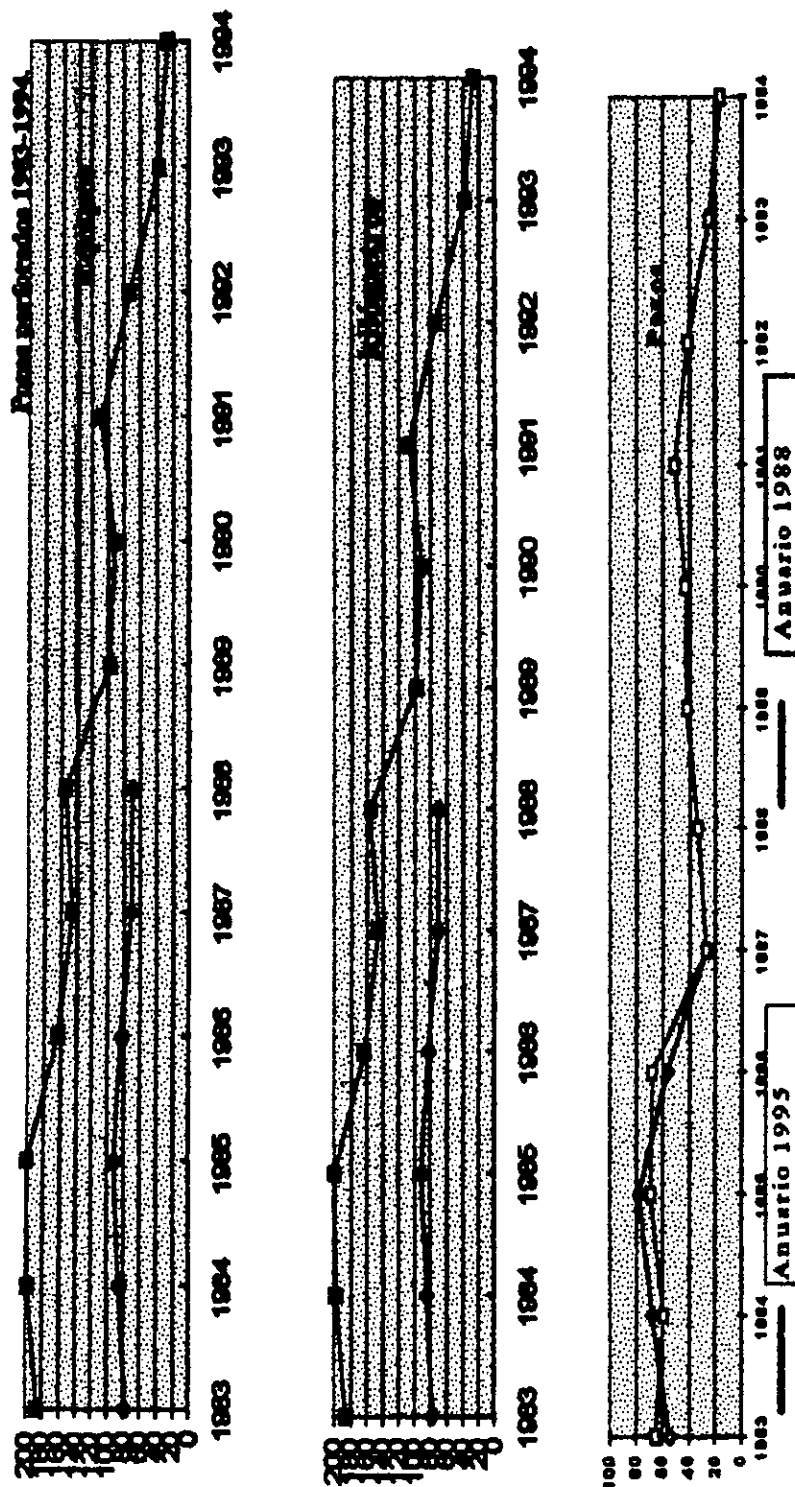


Figura 1.5.

A partir de 1988 ya no se consigna el número de equipos ni los kilómetros perforados para explorar, sin embargo, se aprecia que en la última década, los pozos exploratorios perforados se reducen de 78 a 16, lo que significa haber disminuido la actividad en 80% en sólo 10 años, recordándonos que estamos hablando del total de pozos exploratorios perforados, de los cuales no podemos identificar el número de ellos que trataron de localizar nuevas provincias productoras de gas, pero basándonos en el reporte de las reservas de éste, podemos considerar que en el mismo período de tiempo, la perforación de pozos para localizar nuevos yacimientos que lo contuvieran fue prácticamente cero.

Nótese la drástica reducción de este recurso entre 1984 y 1995, de 76 billones 998 mil millones de pies cúbicos, a casi 68 billones, lo cual significa una reducción del 11% en sólo 10 años; recordando que, de acuerdo a la gráfica de la Figura I.2., el gas no asociado para 1994, ahora sólo representa el 13.9% del total, que equivaldría a un poco menos de 9 y medio billones de pies cúbicos.

Toda la información hasta aquí relatada nos conduce a concluir que en virtud de que por lo menos en los últimos 10 años no se invirtió lo suficiente en localizar y explotar nuevos yacimientos de gas, en la actualidad somos deficitarios de este hidrocarburo, y para confirmarlo citaremos algunos puntos de inflexión.

A partir de 1985 dejamos de exportar gas natural a los Estados Unidos de Norteamérica.

En 1989, nuestra producción nacional de este energético no es suficiente para satisfacer la demanda del país.

De 1989 a 1994, importamos volúmenes crecientes de gas, de 45 a 107 MMPCD en promedio anual, con un máximo de 224 millones como promedio diario durante junio de 1994.

Según refiere el anuario estadístico de Petróleos Mexicanos publicado en 1995, de acuerdo a los promedios de 1994, somos:

El 13° país poseedor de reservas probadas de gas natural, 6 lugares abajo de nuestros vecinos del norte, los Estados Unidos, y dos lugares abajo de nuestros socios comerciales, Canadá.

En lo que respecta a producción, somos el 8° lugar mundial, pero estamos en 6° y 5° lugar después de EEUU y Canadá, respectivamente

Hasta aquí, lo que podemos considerar como el presente, trataremos a continuación, lo que podemos intuir nuestro futuro:

**Enero de 1994:** se concreta el Tratado de Libre Comercio entre nuestro país con Estados Unidos y Canadá.

**Febrero de 1995:** se firman los acuerdos sobre el esquema de intereses petroleros, entre las siguientes entidades: el gobierno federal de los Estados Unidos Mexicanos, el Banco de México, Petróleos Mexicanos, el Departamento del Tesoro de los Estados Unidos de América y el Banco de la Reserva Federal de Nueva York.

**Abril de 1995:** el Ejecutivo Federal envía al Congreso una iniciativa de reformas y adiciones a la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el ramo del petróleo, que modifica substancialmente lo relativo al transporte, almacenamiento, distribución y venta de primera mano del gas natural en nuestro país.

**Mayo de 1995;** el Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, decreta: Se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional, en el ramo del petróleo.

**Noviembre de 1995:** El ejecutivo Federal expide el Reglamento de Gas Natural.

Hasta aquí los aspectos legales, ahora echemos un vistazo a la información técnica, que nos ayude a pronosticar el futuro cercano:

En el Foro sobre perspectivas del gas natural en México, organizado por el IMIQ y con la participación de la Federación de Asociaciones de Ingenieros Químicos y de la AIPM, en octubre del año pasado, altos funcionarios de Petróleos Mexicanos en las ramas de exploración y producción, dieron a conocer los programas de la empresa en relación con el gas natural. A continuación transcribimos textualmente algunos conceptos vertidos en esas conferencias.



## **Exploración**

“La producción de gas en México deberá incrementarse a un ritmo del 6 al 8 % anual para cubrir la demanda, Pemex Exploración y Producción hará frente a este reto mediante la extracción en yacimientos conocidos de sus reservas descubiertas, así como de los nuevos campos que descubra Exploración, que deberán entrar en producción en el corto plazo para sostener el crecimiento de la demanda.”

“Las estrategias de exploración son de dos tipos, una aplicable a las provincias productoras donde los resultados se darán en corto plazo, y otra para las no productoras donde, si bien las posibilidades de descubrir campos de gran tamaño son altas, los resultados se darán a largo plazo. En ambos casos, la aplicación de las tecnologías más avanzadas será necesaria para abatir riesgos y reducir costos.”

“Las expectativas en las primeras áreas alcanzan al menos 28.2 billones de pies cúbicos, mientras que en las segundas el potencial adicional de gas asciende a 50 billones de pies cúbicos, principalmente en áreas costa afuera en el Golfo de México. Los costos de descubrimiento de estas reservas estarán entre 10 y 40 centavos de dólar por millar de pies cúbicos.”

Hasta aquí la transcripción del resumen de la conferencia sustentada sobre las perspectivas de la exploración del gas en México.

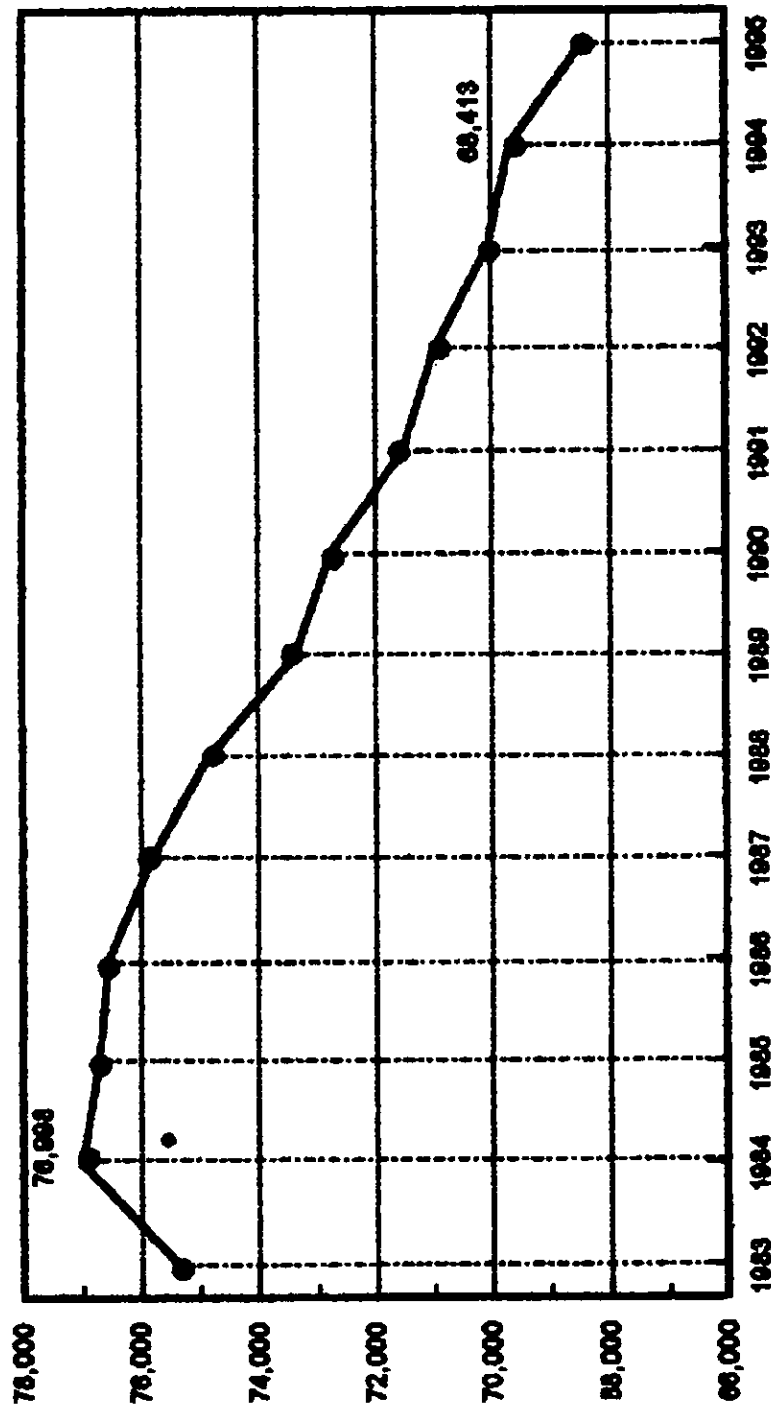
A continuación transcribiremos el capítulo “Estrategia” de la conferencia “La producción de gas en México, pronósticos de oferta.”

## **Estrategia**

“La estrategia que PEP está siguiendo en el área de producción para asegurar el cumplimiento de las necesidades de gas, consta de los siguientes puntos:

- Estudiar los yacimientos para optimizar su desarrollo y su explotación.
- Aplicar reingeniería a pozos cerrados.
- Optimizar las instalaciones para el aprovechamiento del gas.
- Explotación de casquetes de gas.
- Racionar el consumo de energía.

# RESERVAS DE GAS SECO



AÑO

Figura I.6.

Hasta aquí la transcripción de los puntos importantes de estas dos magnas conferencias. Veamos ahora algunos argumentos esgrimidos para justificar la modificación de la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional, que ahora permite la participación del capital privado en el transporte, almacenamiento, distribución y ventas de primera mano del gas en México.

En la página 2 de dicho documento, se dice: "Una industria del gas en rápida expansión, congruente con la amplia disponibilidad de reservas con que cuenta el país, estimularía notablemente la inversión y el empleo."

En la página 5 dice: "Se prevé un rápido crecimiento de la demanda de gas, sobre todo a partir de 1988, cuando entrarán en vigor las normas de protección ambiental críticas. Esta creciente demanda tendrá que satisfacerse mediante importaciones, si no se emprenden de inmediato acciones orientadas a establecer en México una industria del gas, moderna y competitiva."

En la página 4 se lee: "Adicionalmente, la operación de una vigorosa industria del gas permitirá la exportación de excedentes. En un amplio horizonte temporal, puede contemplarse que México se convierta en un exportador importante de gas en el mercado regional de Norteamérica, ante la declinación esperada en algunas de la zonas productoras tradicionales."

Es indudable la importancia técnica y económica que representa el gas y su transporte, por lo cual este trabajo se enfoca a la optimización de las redes de recolección y distribución, lo cual constituye una parte fundamental del problema de transporte.

Se desarrolló un simulador para análisis y diseño de redes de gas en régimen permanente, con las ventajas de la programación orientada a objetos y con un nuevo método de solución que evitará la divergencia durante la búsqueda de la solución; con el fin de apoyar la optimización en el diseño contribuyendo en la reducción de pérdidas de energía y por lo tanto en los costos.

## II. CONCEPTOS Y ECUACIONES BÁSICAS.

El método usado en este trabajo para el diseño y análisis de redes de gas en régimen permanente, es el propuesto por M. A. Stoner, el cual, a su vez es una extensión de investigaciones sobre sistemas de distribución de agua. El programa de cómputo llamado "GASNET" incluye una modificación para obtener una solución del sistema de ecuaciones el cual evita la divergencia y acelera el proceso iterativo.

Con esta técnica, primeramente se simula un sistema de gas compuesto por tuberías y compresores, el cual se resuelve directamente con datos conocidos de presión y gasto y se inicia con datos supuestos para los valores que se desean obtener.

Segundo, los elementos como diámetro de la tubería, caballos de fuerza del compresor, densidad del gas transportado, así como la temperatura promedio de la red, se determinan especificando las presiones y gastos apropiados, por lo cual se puede medir la iteración de muchos componentes en el mismo programa.

Antes de plantear el marco matemático teórico con ecuaciones, es necesario definir dos términos básicos:

- *Nodos*: Son los puntos de referencia para presiones del sistema o son puntos que representan donde uno o más conectores terminan o donde entra o sale flujo del sistema.
- *Conectores de nodos*: Establece la aplicación de todo posible elemento, en este caso, tuberías y compresores.

El modelo propuesto en este trabajo se construye con las ecuaciones para cada nodo del sistema. La ecuación de flujo para cada conector de nodo se sustituye para eliminar el gasto del elemento. Esto resulta en una aplicación de ecuaciones simultáneas no-lineales las cuales se linealizan y se resuelven por la técnica de gradiente conjugado.

## II.1. Formulación del Modelo Matemático

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

$$F_i = \sum_{j \in (i,j) \neq \varnothing} s_{ij} q_{ij} + Q_i \quad i \in N \quad (\text{II.1.1})$$

En donde:  $s_{ij}$  es una variable que indica el sentido del flujo, es decir, el subíndice  $i$  denota de que nodo parte el flujo y el subíndice  $j$  denota a cuál nodo se dirige. El flujo del nodo  $i$  al  $j$  es positivo de lo contrario el flujo se tomará como negativo.  $q_{ij}$  es el gasto de gas que pasa a través del conector de los nodos  $i$   $j$ ; y  $Q_i$  es un término que indica la adición o extracción de masa al sistema a través del nodo  $i$ . Esta ecuación establece que la masa que entra al nodo es igual a la que sale, (por esta razón, algunas veces se le llama ecuación de balance en los nodos) y describe 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  $ij$ ), como se definen a continuación:

### Conectores de Nodos

#### A) Tuberías

Para las tuberías existen diferentes ecuaciones, tales como la de Weymouth, Panhandle, etc.; pero en general, éstas se pueden reducir algebraicamente a la forma:

$$q_{ij} = c_{ij} |P_i^2 - P_j^2|^n \quad (\text{II.1.2})$$

En donde:  $C_{ij}$  representa al coeficiente de transmisión de la tubería que depende de la geometría del tubo, de las condiciones de flujo y de la composición del gas;  $P_i$  es la presión del fluido en el nodo  $i$ ;  $P_j$  es la presión del fluido en el nodo  $j$ ; y  $n$  es un exponente que depende de la forma de la ecuación.

---

La ecuación utilizada en este trabajo es la siguiente:

$$q_{ij} = 842.69E \left[ \frac{(P_i^2 / z_i) - (P_j^2 / z_j)}{0.6215L_{ij}} \right]^{0.5} d_{ij}^{2.667} \quad (II.1.3)$$

### B) Compresor

La termodinámica es la herramienta fundamental para evaluar el comportamiento de un compresor centrífugo. Los procesos que se aplican con más frecuencia para describir los ciclos de compresión, son: proceso adiabático y proceso politrópico.

En la Figura II.1.1 se muestra el ciclo de compresión para un proceso adiabático; la línea AB, indica un proceso adiabático de  $p_1 V_1^K = p_2 V_2^K$ , donde K es la relación de calores específicos

$$K = \frac{C_p}{C_v} \quad (II.1.4)$$

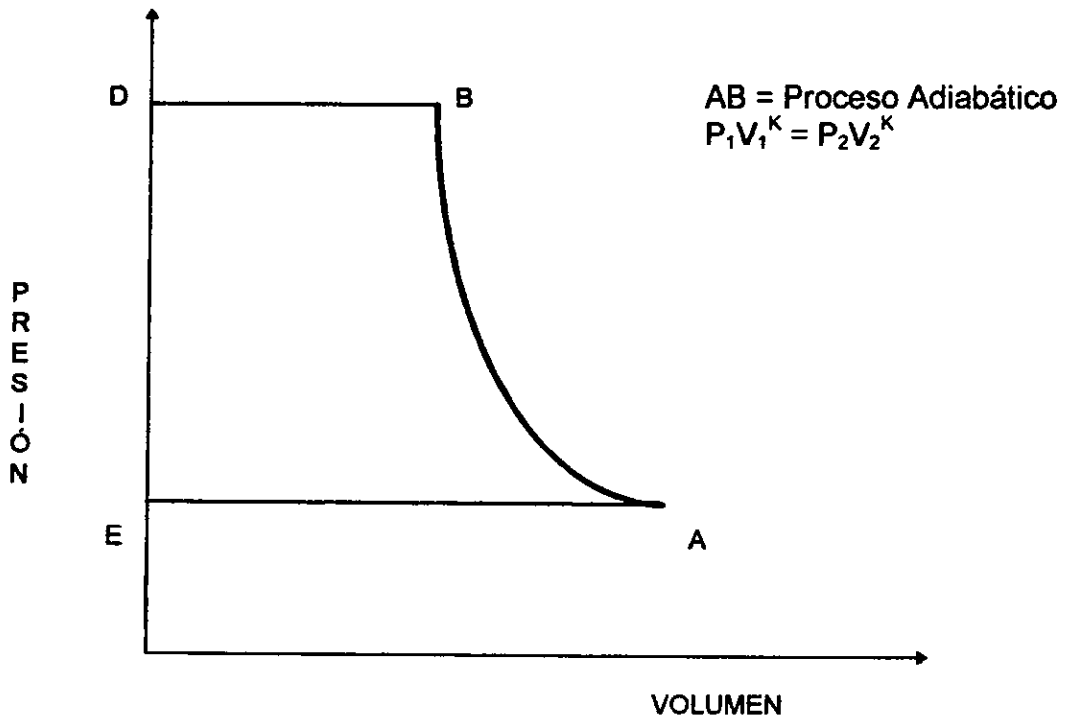


Figura II.1.1. Ciclo de compresión para un proceso adiabático.

Para un proceso adiabático:

$$PV^k = CTE \quad (II.1.5)$$

Por otra parte, el trabajo realizado por el compresor en un proceso adiabático, está dado por:

$$\int_1^2 V dp + \Delta \frac{u^2}{2gc} + \frac{g}{gc} \Delta X + 1w + w = 0 \quad (II.1.6)$$

Sin embargo si los cambios en la energía cinética, energía potencial o de posición así como las pérdidas de energía, son considerados despreciables. La ecuación se reduce a:

$$-w = \int_{P_1}^{P_2} V dp \quad (II.1.7)$$

Sustituyendo la ecuación (II.1.5) y (II.1.4) en la ecuación (II.1.7), se obtiene el trabajo adiabático teórico de un compresor en libras pies fuerza por libra masa de gas, es:

$$-W \left( \frac{ftlb_f}{lb_m} \right) = K / (K - 1) \frac{53.241 T_1}{G} \left[ \left( P_2 / P_1 \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] \quad (II.1.8)$$

Debido a que existe una desviación importante del comportamiento real de un gas real en comparación con un gas ideal, la ecuación anterior se modifica empíricamente, resultando:

$$-W \left( \frac{Hp}{MMcfd} \right) = \frac{k}{k-1} \frac{3.027 Pb}{Tb} T_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{z_1(k-1)}{k}} - 1 \right] \quad (II.1.9)$$

Tomando en cuenta que:

$$\frac{\text{Potencia}}{\text{Gasto}} = -W \quad (\text{II.1.10})$$

Igualando las ecuaciones (II.1.9) y (II.1.10) y despejando el Gasto, obtenemos la ecuación nodal para representar un compresor dentro de la red de gas:

$$q_g = Hp \times \frac{k-1}{k} \times \frac{T_b}{3.027 P_b T_1} \times \frac{1}{\left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{Z_1(k-1)}{k}} - 1 \right]} \quad (\text{II.1.11})$$

La relación de calores específicos, K, se calcula utilizando la Figura A-1 en función de la temperatura a condiciones de succión, así como de la densidad relativa del gas. Sin embargo, como se puede observar se trata de datos experimentales, los cuales en este trabajo aproximamos a una relación funcional:

$$K = [-0.0009T + 1.7919][PM]^{0.00017-0.1174} \quad (\text{II.1.12})$$

La gráfica y una breve explicación del método para obtener la expresión anterior, se pueden consultar en el apéndice A.

Además, la determinación del factor de compresibilidad del gas, necesaria en ambas ecuaciones nodales se calcula por medio de la ecuación de estado, presentada por Hall y Yarborough (1973), la cual se basa en la correlación de Starling-Carnahan. Los coeficientes de la correlación fueron establecidos con datos tomados de las cartas de Standing y Katz para el factor Z. Consultar el apéndice B.



## II.2. Solución del Sistema de Ecuaciones con el Método de Gradiente Conjugado.

Antes de describir este concepto, es necesario definir la técnica de optimización de ecuaciones no-lineales. ¿Por qué se tiene que optimizar?, esto se resuelve fácilmente al planteamos ésta pregunta: ¿Cuál es el valor del agua?, para un hombre agonizante de sed, el concepto agua es demasiado extenso, pero para un hombre ahogándose ésta no tiene ningún valor. Es entonces donde la pregunta depende de cuánta agua se dispone, se requiere o cuál es el uso. Así la optimización es el ajuste de variables para obtener el mejor resultado en algunos procesos.

Considérese la representación isométrica de una función de dos variables mostrada en la Figura II.2.1., así como la gráfica correspondiente al contorno de curvas de nivel que es mostrado en la II.2.2. La ecuación para esta función es:

$$F(x,y) = -(x^2 + y - 11)^2 - (x + y^2 - 7)^2 \quad (\text{II.2.1})$$

Los valores de la función están en un plano x-y, en este caso 2 dimensiones. En general, n variables para n espacios. "Como regla, el teorema para funciones de dos variables se puede aplicar para funciones de más de dos variables, fuera de algún cambio esencial en argumento".

Ahora el problema de optimización puede comenzar de la manera siguiente: Dada alguna localización en la superficie de la Figura II.2.1. ¿Cómo pueden ajustarse "x" y "y" para encontrar los valores correspondientes a un máximo o mínimo de la función?. Ésta es la misma tarea a la que se enfrenta un ciego al intentar subir una montaña: ¿Qué secuencia se ajustará a la dirección ascendente para llegar a la cima?. La cumbre depende en dónde comienza el ascenso.

Por esta razón, uno debe anticipar el uso de pendientes en varias direcciones especialmente en la que se tiene la pendiente ascendente (conocido como el gradiente a este punto). Además, los cuatro puntos donde la función tiene un máximo o un mínimo, son los mostrados en la Tabla II.2.1 y requieren cumplir la siguiente condición:

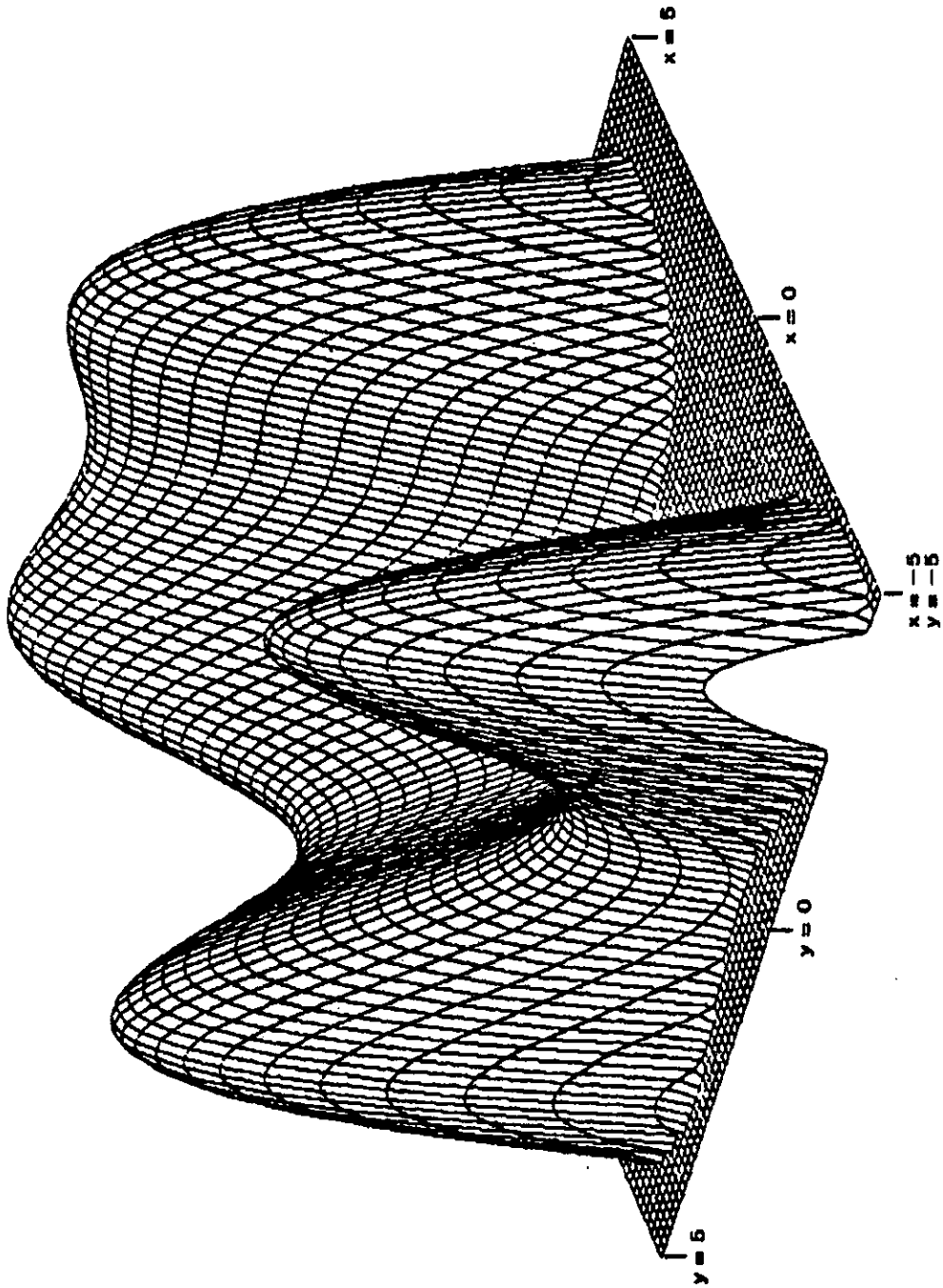


Figura II.2.1. Superficie en un espacio de tres dimensiones.

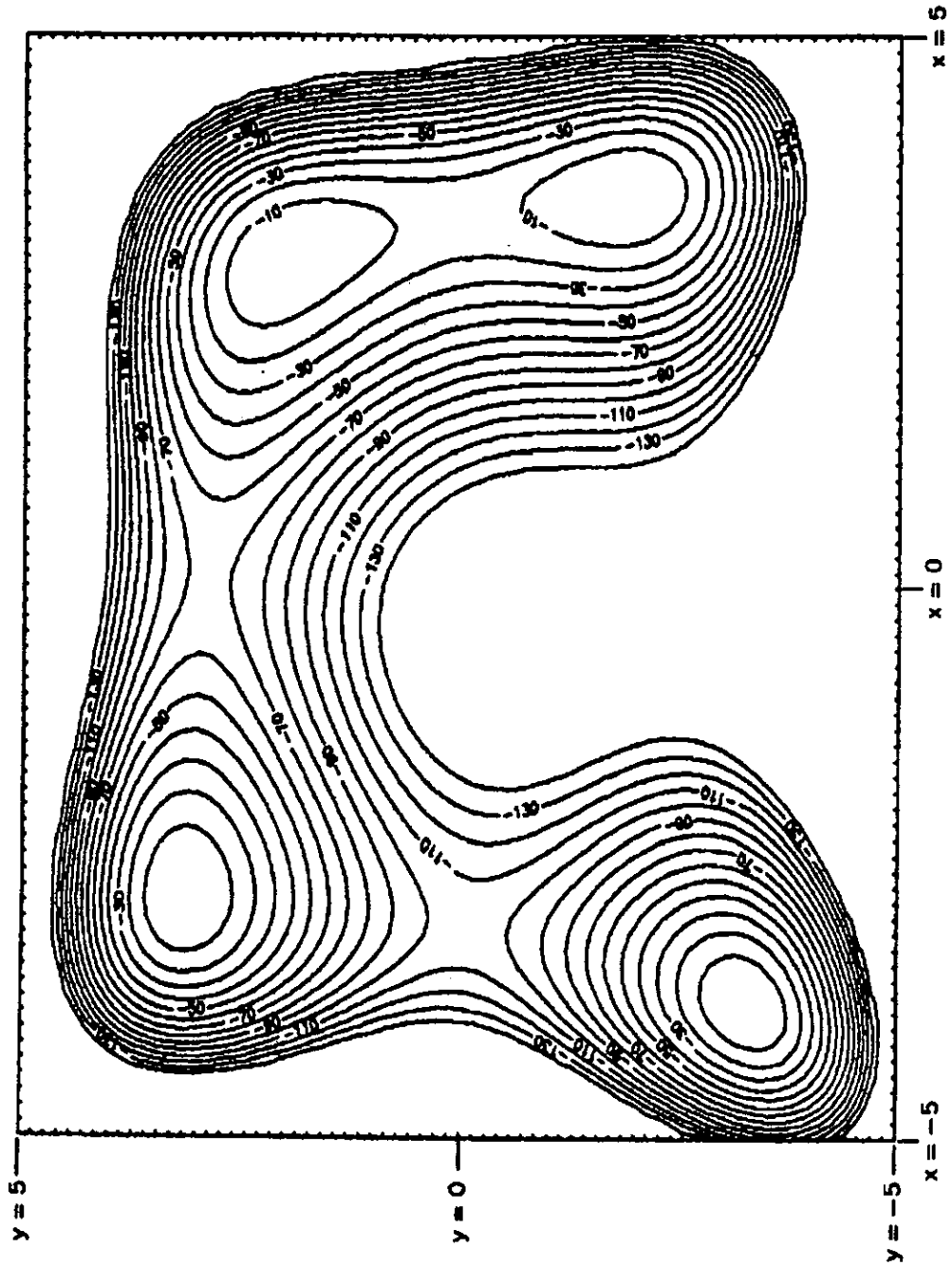


Figura II.2.2. Contorno de curvas de nivel de la superficie de la Figura II.2.1.

$$\frac{\partial F}{\partial x} = -4x(x^2 + y - 11) - 2(x + y^2 - 7) \quad (II.2.2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = -2(x^2 + y - 11) - 4y(x + y^2 - 7) \quad (II.2.3)$$

Tabla II.2.1. los 4 puntos donde la función es máxima

x	3.0000	3.5844	-3.7793	-2.8051
y	2.0000	-1.8481	-3.2832	3.1313

Al sustituir los puntos en las derivadas corroboramos el hecho de que se igualan a cero, por lo tanto se trata de máximos y mínimos.

El principio en el cual se basa la eficiencia de la optimización, es que exista un acercamiento a un máximo o un mínimo, por medio de una función general cuadrática. Por ejemplo, un acercamiento a la concavidad en el punto  $x=-3.7793$ ,  $y=-3.2832$ , de la Figura II.2.1, se puede realizar por:

$$F1(x,y) = ax^2 + bx + cxy + dy + ey^2 + k \quad (II.2.4)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a &= -58.13 & d &= -182.95 \\ b &= -346.63 & e &= -44.12 \\ c &= 28.25 & k &= -955.34 \end{aligned}$$

Esta función es cuadrática en  $x$  y  $y$  porque el máximo grado es 2, sin embargo, la aproximación es buena en una frontera muy pequeña de la concavidad y se muestra en la Figura II.2.3.

Las conclusiones importantes concernientes a una aproximación cuadrática son:

1. Se requieren algunos ensayos para aproximarse a un máximo o un mínimo.
2. Una función cuadrática es la base para la estrategia de optimización cercana a un máximo o mínimo.
3. La función cuadrática hace la conexión entre la teoría de optimización y la solución de los sistemas de ecuaciones lineales.

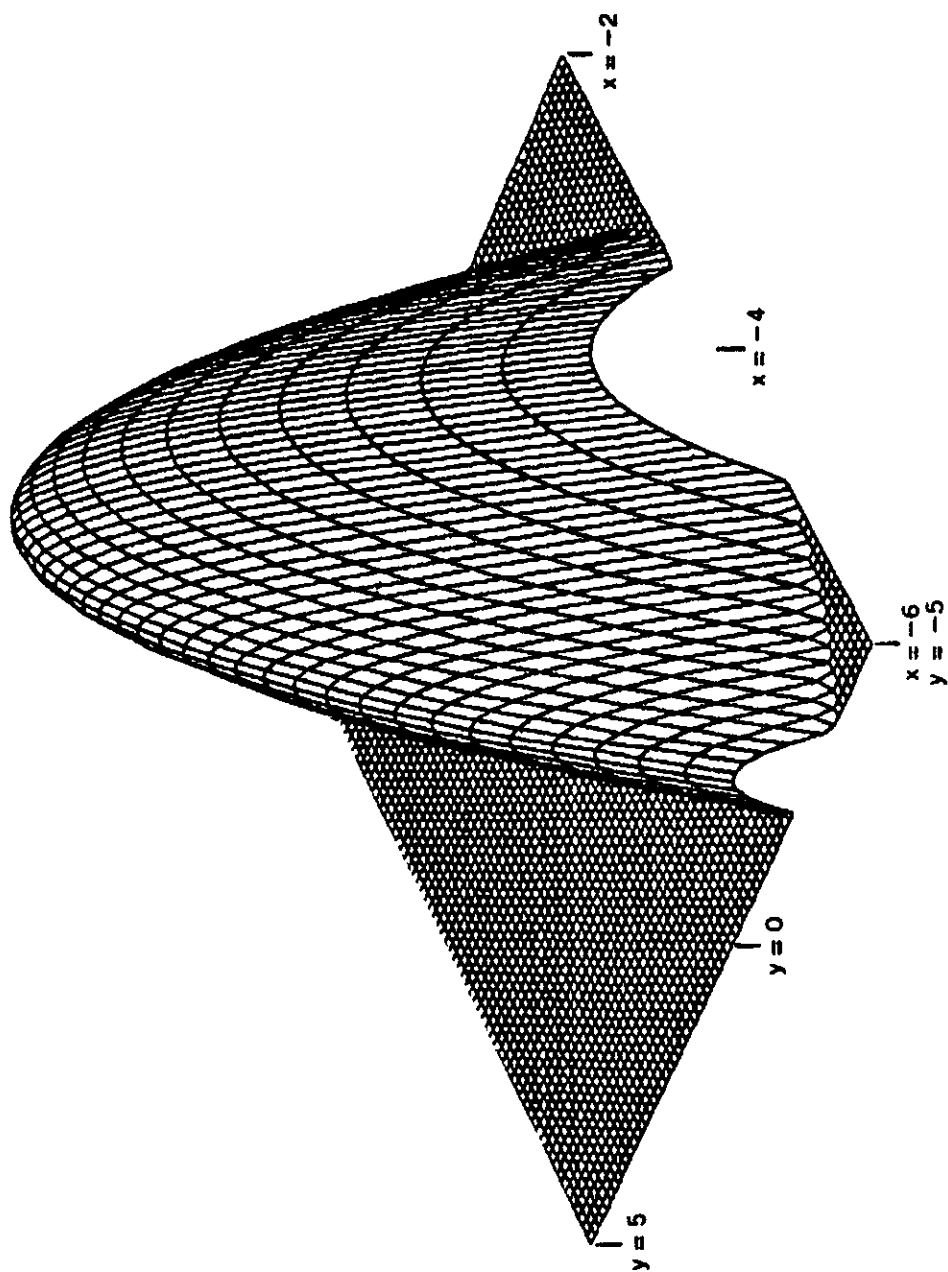


Figura II.2.3. Aproximación de un máximo de la Figura II.2.1. por una ecuación cuadrática.

El inicio del problema de optimización es minimizar o maximizar alguna función escalar de un vector:

$$F(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (\text{II.2.5})$$

sujeta al condicionamiento, expresado como funciones vector de un vector:

$$h(x) = 0, \quad h \text{ una aplicación } E \text{ que contiene } q \text{ funciones} \quad (\text{II.2.6})$$

$$c(x) \geq 0, \quad c \text{ una aplicación } Y \text{ que contiene } m-q \text{ funciones} \quad (\text{II.2.7})$$

Esta notación es para el caso donde hay  $n$  variables, no tan solo las dos previamente llamadas "x" y "y". En la práctica,  $n$  puede ser tan alto como 50 o más. Las variables se definen como un vector, que es:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{II.2.8})$$

Lejos de presentar una optimización, se desarrolló el máximo de una función, simplemente porque esto es más fácil para explicar en superficies con cumbres como la Figura II.2.1. La diferencia matemática entre un máximo y un mínimo de una función, es que al referirnos a maximizar  $F(x)$  es equivalente a minimizar  $-F(x)$  tomando la dirección descendente.

Por otra parte, esta descripción de las funciones no-lineales que comenzó con las funciones cuadráticas, nos sirve de base para la introducción de la serie de Taylor de muchas variables, la cual con la aplicación del vector gradiente, nos permite el desarrollo de procesos iterativos para realizar una secuencia de direcciones de investigación en un espacio multidimensional para llegar a la solución.

**Gradiente de una Función:** La derivada parcial de una función,  $f_1$ , con respecto a cada una de las  $n$  variables, se denomina comúnmente gradiente de una función y se denota por  $\nabla f$ :

$$\nabla f_{\text{next}} = \begin{Bmatrix} \partial f / \partial \alpha_1 \\ \partial f / \partial \alpha_2 \\ \dots \\ \partial f / \partial \alpha_n \end{Bmatrix} \quad (\text{II.2.9})$$

El gradiente es un vector de n-componentes y nos movemos a lo largo de la dirección del gradiente desde un punto en el espacio n-dimensional, el valor de la función se incrementará rápidamente, desafortunadamente, la dirección de la pendiente ascendente es una propiedad local y no una global. Pero en nuestro caso utilizamos el gradiente para obtener el punto mínimo usando la dirección conjugada que es cuadráticamente convergente. Esto asegura que el método minimizará una función cuadrática en n pasos o menos.

Algoritmo :

Se tiene el sistema lineal N X N.

$$A\bar{x} = \bar{b} \quad (\text{II.2.10})$$

el algoritmo de gradiente conjugado resuelve (II.2.10) solamente en el caso de que A sea simétrica y positiva. Esto se basa en la idea de la minimización de la función:

$$f(x) = \frac{1}{2}x \cdot A \cdot x - b \cdot x \quad (\text{II.2.11})$$

Esta función se minimiza cuando su gradiente es igual a cero y es equivalente a (II.2.10).

$$\nabla f = A \cdot \bar{x} - \bar{b} \quad (\text{II.2.12})$$

La minimización se lleva a cabo por la generación de una sucesión de direcciones de investigación  $P_k$  y mejorando la minimización de  $X_k$ . En cada paso se calcula una cantidad  $\alpha_k$  para minimizar  $f(X_k + \alpha_k P_k)$ , y  $X_{k-1}$  se aplica igualmente para el nuevo punto  $X_k + \alpha_k P_k$ .

La  $P_k$  y  $X_k$  se construyen de tal manera que  $X_{k-1}$  es también la minimización de  $f$  sobre el espacio vectorial total de la dirección real tomada  $(P_1, P_2, \dots, P_k)$ . Después de  $N$  iteraciones llegamos a la solución para (II.2.10).

1) Comenzamos con una suposición inicial arbitraria  $X_1$ . Denominando  $r_1$  como residuo.

$$r_1 = b - A \cdot X_1 \quad (\text{II.2.13})$$

2) Aplicamos la primera dirección de investigación con la siguiente recurrencia:

$$\alpha_k = \frac{\bar{r}_k \cdot \bar{r}_k}{\bar{P}_k \cdot A \cdot P_k} \quad (\text{II.2.14})$$

$$r_{k+1} = r_k - \alpha_k A \cdot P_k \quad (\text{II.2.15})$$

$$\bar{r}_{k+1} = \bar{r}_k - \alpha_k A^T \quad (\text{II.2.16})$$

$$\beta_k = \frac{\bar{r}_{k-1} \cdot \bar{r}_{k+1}}{\bar{r}_k \cdot \bar{r}_k} \quad (\text{II.2.17})$$

$$P_{k+1} = r_k + \beta_k P_k \quad (\text{II.2.18})$$

$$\bar{P}_{k+1} = \bar{r}_k + \beta_k \bar{P}_k \quad (\text{II.2.19})$$

3) Formamos la secuencia para mejorar las estimaciones:

$$\bar{X}_{k+1} = \bar{X}_k + \alpha_k \bar{P}_k \quad (\text{II.2.20})$$



La ecuación (II.2.20) asegura que  $r_{k+1}$  desde la recurrencia por el residuo  $b-A \cdot x_{k+1}$  corresponde a  $x_{k+1}$ . Desde  $r_{m+1}=0$ ,  $x_{m+1}$  es la solución para la ecuación (II.2.10). De lo contrario, aplicamos el valor de  $i=i+1$ , y repetimos los pasos 2 y 3 hasta que la convergencia se alcance, como se aprecia en la Figura II.2.4.

Aplicando la teoría anterior a nuestro problema, inicialmente se representa un sistema real mediante nodos y elementos conectores de los nodos.

En este sistema se asignan valores a N variables (presiones y gastos) las cuales permanecen constantes. El problema es encontrar valores de las N variables restantes, que satisfagan las ecuaciones siguientes :

Tuberías

$$F_i = \sum s_{ij} \left( 842.62E \left[ \frac{(p_i^2 / z_i) - (p_j^2 / z_j)}{0.6215L_{ij}} \right]^{0.5} d_{ij}^{2.667} \right) + Q_i \quad (II.2.21)$$

Compresores

$$F_i = \sum s_{ij} \left( Hp \frac{k-1}{k} \frac{Tb}{3.027PbT_i} \frac{1}{\left[ \left( \frac{p_j}{p_i} \right)^{z_i(k-1)/k} - 1 \right]} \right) + Q_i \quad (II.2.22)$$

El sistema de ecuaciones no-lineales se linealiza y después se resuelve con el método de gradientes conjugados. Considere un sistema de N ecuaciones no lineales del tipo  $F_i(X_1, X_2, \dots, X_N) = 0$ , para  $i=1, 2, \dots, N$ ; con incógnitas  $X_1, X_2, \dots, X_N$ . El valor de las incógnitas al nivel de iteración  $K + 1$ , está dado por:

$$X_i^{K+1} = X_i^K + \Delta X_i^{K+1} \quad i \in N \quad (II.2.23)$$

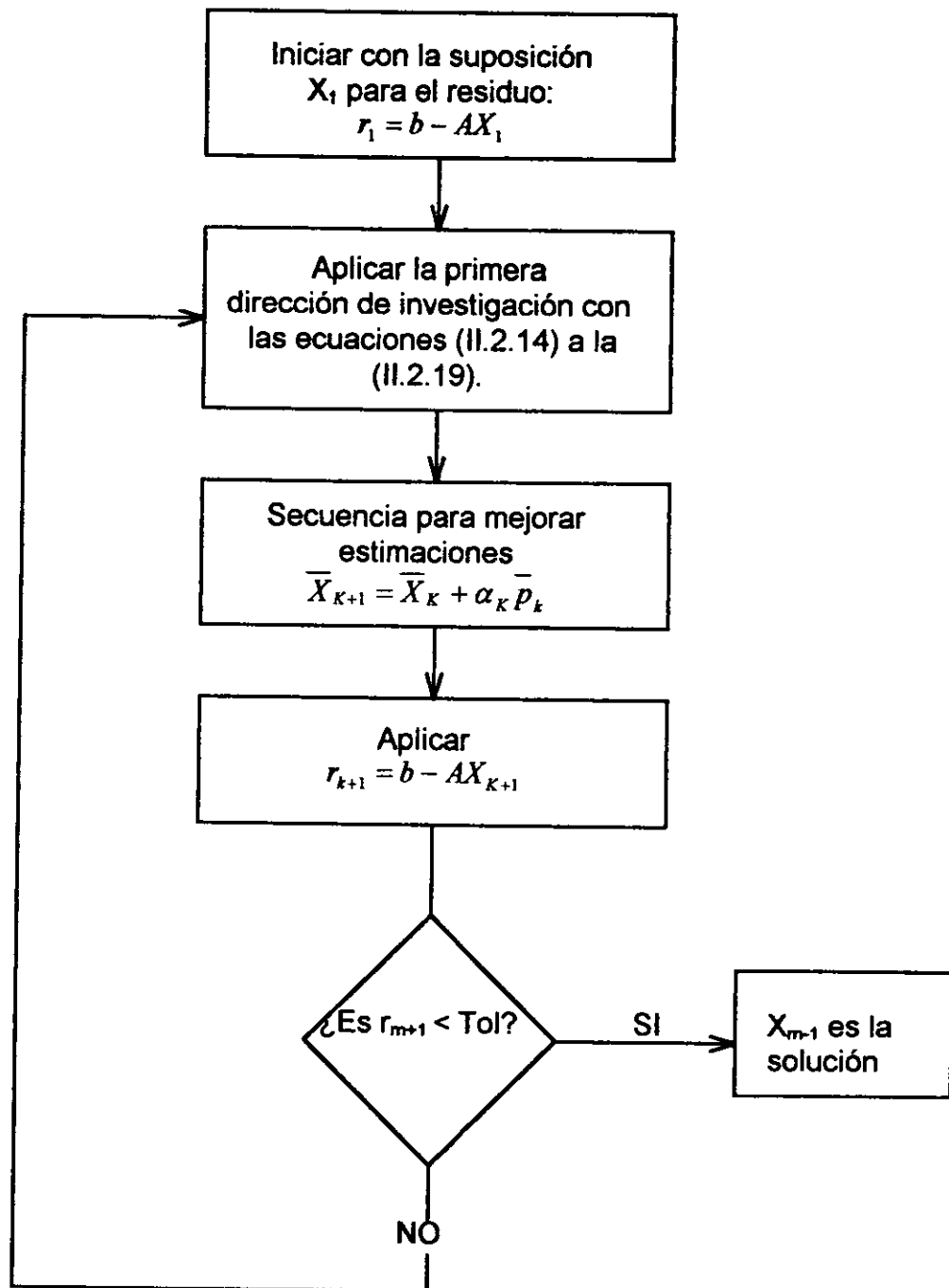


Figura II.2.4. Diagrama de Bloques del Método de Gradientes Conjugados.

En donde el valor de  $\Delta X_i^{K+1}$ , se obtiene mediante la solución del sistema de ecuaciones lineales siguiente:

$$\sum_{j=1}^N \left( \frac{\partial F_i}{\partial X_j^K} \Delta X_j^{K+1} \right) = -F_i(X_1^K, X_2^K, \dots, X_N^K) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{II.2.24})$$

Este sistema de ecuaciones se expresa en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X_1} & \frac{\partial F_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial X_N} \\ \frac{\partial F_2}{\partial X_1} & \frac{\partial F_2}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial X_N} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \frac{\partial F_N}{\partial X_1} & \frac{\partial F_N}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial X_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1^{K+1} \\ \Delta X_2^{K+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta X_N^{K+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1 \\ -F_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ -F_N \end{bmatrix} \quad (\text{II.2.25})$$

Las derivadas parciales, cuando los elementos conectores son tuberías o compresoras, están dadas por:

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_j} = \sum_{j/(i,j) \in M} \frac{\partial F_j}{\partial P_i} \quad (\text{II.2.26})$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial Q_i} = 1 \quad (\text{II.2.27})$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial Q_j} = 0 \quad (\text{II.2.28})$$

Para tuberías:

$$\frac{\partial F_i}{\partial F_j} = -2nC_y P_j \left| \frac{P_i^2}{Z_i} - \frac{P_j^2}{Z_j} \right|^{n-1} \quad (\text{II.2.29})$$

Para compresores:

$$\frac{\partial F_i}{\partial H_{p_j}} = \frac{1}{K_1 \left[ \left( \frac{P_j}{P_i} \right)^{K_2} - 1 \right]} \quad (\text{II.2.30})$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_j} = - \frac{K_1}{\left[ \left( \frac{P_j}{P_i} \right)^{K_2} - 1 \right]^2} \left( \frac{K_2 P_j^{K_2-1}}{P_i^{K_2}} \right) \quad (\text{II.2.31})$$

En resumen la secuencia de cálculo consiste en:

- a) Asignar valores supuestos a las incógnitas  $X_i$  (presiones, gastos y  $H_p$ 's).
- b) Sustituir el valor actual de las incógnitas en las ecuaciones (II.2.21) y (II.2.22), y obtener el valor de  $F_j$  para  $j=1, 2, \dots, N$ .
- c) Probar si  $|F_i|_{\text{máx}}$  es menor o igual que cierta tolerancia fijada. Si ocurre esto, el problema está resuelto y los valores actuales de las incógnitas son la solución del problema. Si no, continuar con el paso (d).
- d) Calcular el valor de las derivadas parciales de  $F$  con respecto a todas las incógnitas, usando las ecuaciones de la (II.2.26) a la (II.2.31).
- e) Resolver el sistema de ecuaciones (II.2.24) para  $\Delta X_i$  ( $\Delta p_i$ ,  $\Delta Q_i$  o  $\Delta H_p$ ) con el método de Gradientes conjugados.
- f) Calcular el nuevo valor de las incógnitas con las ecuaciones (II.2.23).
- g) Regresar al paso (b) y repetir el procedimiento.

Para clarificar estos conceptos obsérvese el diagrama de flujo de la Figura II.2.5.

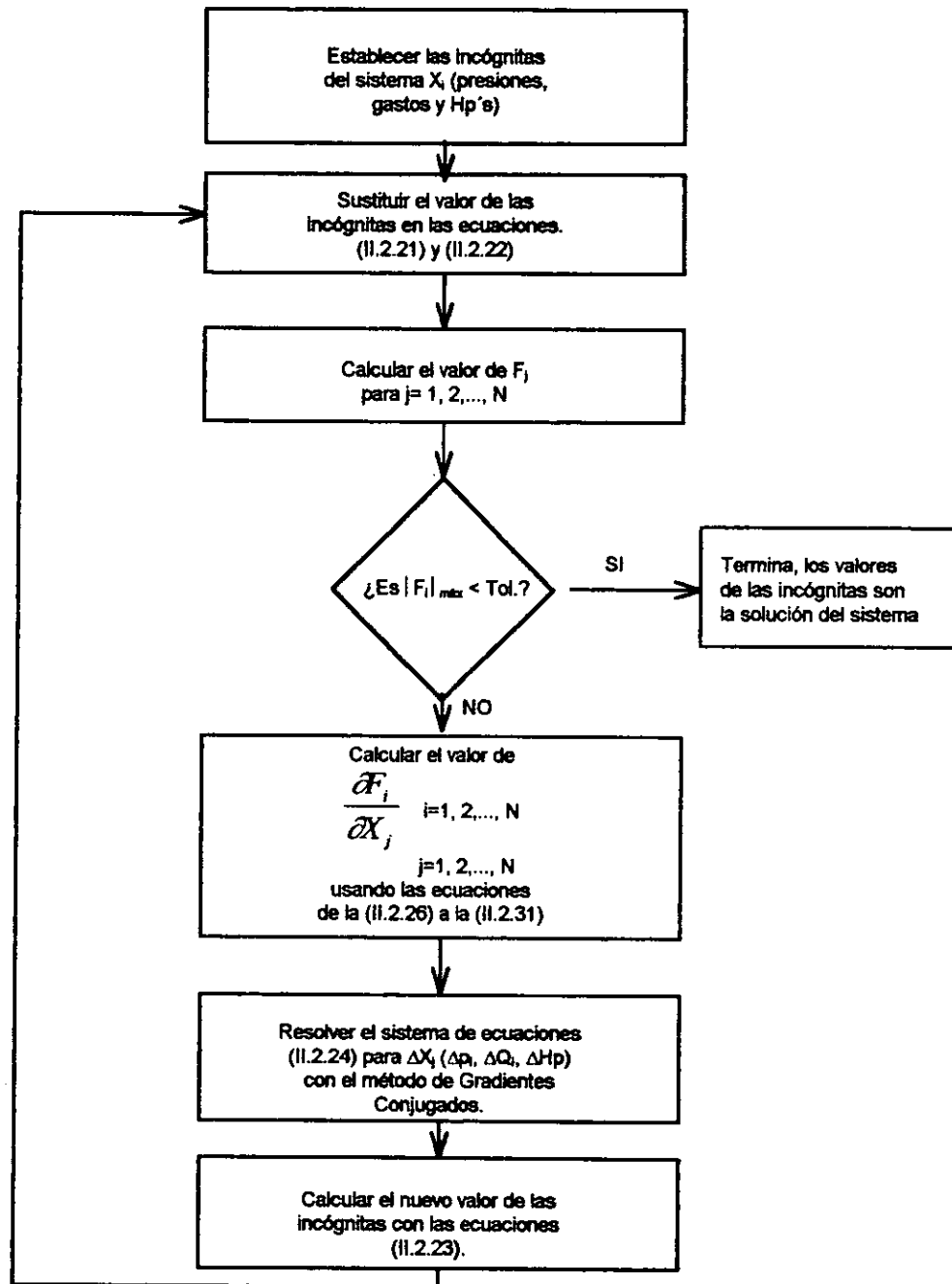


Figura II.2.5. Diagrama de Bloques del Procedimiento de Cálculo.

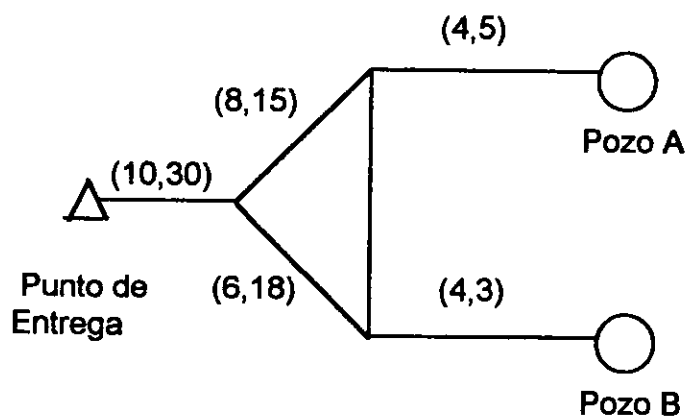
### II.3. Problemas Numéricos

#### Almacenamiento ordenado de matrices ralas

La mejor forma de almacenar la información de este tipo de matrices es usando una forma compacta que toma en cuenta solamente los elementos de la matriz que no son cero, ya que por una parte se ahorra tiempo al evitar la realización de operaciones innecesarias y por otra se reduce el espacio para su almacenamiento.

Por estas razones, en este trabajo hay dos métodos para el almacenamiento de las matrices ralas, el primero para los datos generales y linealizar el sistema de ecuaciones no-lineal, el segundo para la manipulación de los datos del sistema linealizado para el momento de solucionar con la técnica de gradientes conjugados.

Observemos el siguiente ejemplo para un sistema de 6 nodos:



Donde:  $(10, 30)$   
 ↙ ↘  
 Diámetro, Pg. Longitud, Km.

Fig.II.3.1.

En la Figura II.3.1. se presentan los diámetros y longitudes, en la Figura II.3.2. se muestra la representación por medio de nodos y conectores, así como las incógnitas, y los datos de presiones y gastos reales del sistema.

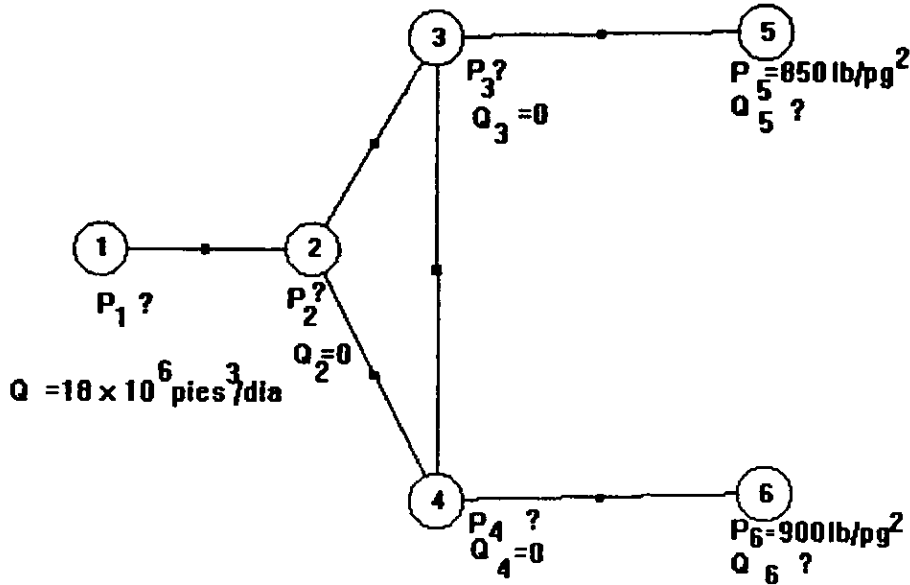


Figura II.3.2.

De esta manera la matriz rala contiene las longitudes en la parte triangular superior derecha, mientras que los diámetros son colocados en la parte triangular baja de la izquierda y la diagonal principal indica con ceros cuando se trata de una presión como incógnita, con un -1 cuando es el gasto y si la red cuenta con compresores, las incógnitas se indican con un 2 y son la presión de descarga y  $H_p$  del compresor.

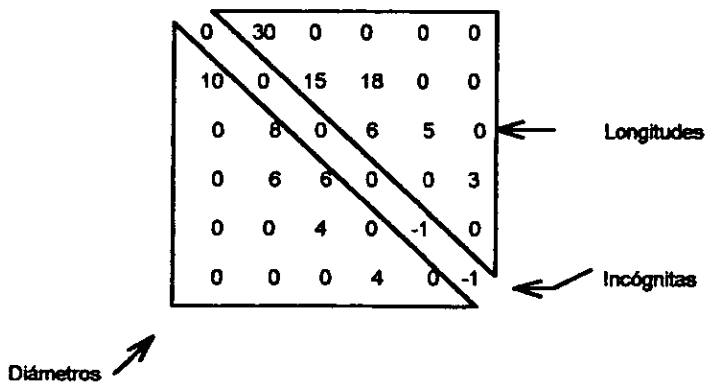


Figura II.3.3.

La posición que tienen los datos del diámetro y longitud en la matriz indican la conexión entre nodos, por ejemplo en la Figura II.3.1. se tiene la conexión entre el nodo 1 y 2, su diámetro y longitud son (10,30) respectivamente; por lo cual en la matriz las coordenadas del 10 son (2,1) y del 30 son (1,2). Los datos almacenados establecen así la geometría de la red de gas.

Después de obtener el sistema de ecuaciones lineales, es necesario el uso de un método para matrices cuadradas debido a que es el caso de los sistemas que se desarrollaron para el modelo matemático y se requiere para resolver el sistema por medio de Gradientes Conjugados. Este método de almacenamiento se describe a continuación:

Para representar una matriz A de tamaño  $N \times N$ , se utilizan dos vectores llamados *sa* e *ija*. Las reglas de almacenamiento son:

- Los primeros elementos del vector *sa* son los valores en la diagonal de la matriz A; el siguiente dato es un valor arbitrario.
- En la segunda parte del vector *sa* se encuentran los valores de la matriz A que no son de la diagonal principal y que además son diferentes de cero. El valor que separa ambas partes de este vector no tiene ningún valor, solo es un indicador.
- El vector *ija* almacena la localización de los elementos diferentes de cero que no pertenecen a la diagonal. Los primeros datos se refieren a la posición de dichos elementos en el vector *sa* y la última parte del vector *ija* la constituyen la posición de los mismos elementos pero de acuerdo a la columna a la que corresponden en la matriz A.

Como se tiene en la siguiente matriz:

3	0	1	0	0
0	4	0	0	0
0	7	5	9	0
0	0	0	0	2
0	0	0	6	5

índice K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>ija(k)</i>	7	8	9	10	11	12	3	2	4	5	4
<i>sa(k)</i>	3	4	5	0	5	x	1	7	9	2	6



### III. CONCEPTOS DE LA PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS.

El proyecto fue diseñado bajo los términos de la programación orientada a objetos con el uso de Visual Basic, es decir, se aprovechó el ambiente gráfico para crear una aplicación Windows, con código BASIC. Además, es importante señalar que al realizar este tipo de aplicaciones con características de objetos, menús, ventanas redimensionales, soporte de ratón e íconos; todos estos elementos pueden hallarse en la mayoría de las aplicaciones Windows, facilitando el uso de los programas.

Esta forma de programación se lleva a cabo de una manera "visual", esto es, planear de modo que los controles puedan operar juntos para darle funcionalidad a cualquier ventana del proyecto, sin alterar a los demás elementos de éste.

#### III.1. Comprensión de la terminología de Visual Basic.

Es necesario familiarizarse con la terminología Visual Basic debido al enfoque orientado a los eventos del software para programar aplicaciones. Las siguientes definiciones establecen los elementos de una aplicación:

- **Control:** Un término general para describir cualquier forma o elemento gráfico que se dibuje, incluyendo cajas de texto, cajas de listados, botones de comandos, cajas de imágenes, barras de desplazamiento e íconos. Además, un control permite asignar subrutinas, conocidas como métodos; éstos son exclusivamente para acceder y manipular el control. En Visual Basic, los términos control y objeto se denominan indistintamente.

- **Evento:** Una acción reconocida por un control Visual Basic.
- **Forma:** Una ventana que se crea y adapta a las necesidades de la aplicación.
- **Método:** Una palabra de código Visual Basic que es similar a una función o instrucción, pero que siempre actúa sobre un control en particular. Para cada control, Visual Basic predefine una serie de métodos específicos.
- **Procedimiento:** Se refiere tanto a la secuencia de instrucciones Visual Basic que se ejecutan en grupo durante la corrida, llamadas Sub y Function, como a procedimientos de evento y generales. Los primeros se limitan a las formas y los controles, mientras que los segundos son para toda la aplicación y pueden ser requeridos por procedimientos de evento.
- **Proyecto:** Conjunto de todos los archivos que forman la aplicación.
- **Propiedad:** Característica o atributo específico para un control.
- **Definición:** Valor de una propiedad. Se puede cambiar en la mayoría de las propiedades mientras se está construyendo una aplicación y el código cuando se corre también puede cambiar las definiciones.

Mediante el proyecto, la persona se comunica o, más precisamente, tiene una interfaz con la computadora. En otras palabras, la interfaz es aquel componente de una aplicación que traduce una acción del usuario en una o más peticiones para desarrollar funciones y lo retroalimenta con las consecuencias de sus acciones.

Visual Basic permite diseñar la interfaz Windows para dar un método consistente de interacción con la computadora. Por lo tanto, los controles que se coloquen en una aplicación se convierten en las señales del camino que los usuarios seguirán permitiéndole salir en cualquier momento.

### III.2. Utilización del Ambiente de Trabajo Visual BASIC.

El sistema de programación Visual Basic hace posible la creación de objetos, llamados controles, establece y cambia sus propiedades y después les asigna los códigos BASIC funcionales a cada uno de ellos. Este ambiente requiere que se programe de una manera totalmente diferente cuando se elabora un código para aplicaciones. En estas circunstancias con un procedimiento de evento se estructuran los códigos, en donde el procedimiento establece una relación entre un control y un evento. Esta relación es la que hace posible invocar un código e indicar a la aplicación que realice una actividad específica.

En resumen la filosofía de Visual Basic es sencilla: primero, se elaboran controles como ventanas, íconos y menús. Después, se escriben los procedimientos que invocan cada uno de estos controles en un sistema de desarrollo orientado a eventos. Un programador no tiene que escribir códigos para crear los objetos que conforman una interfaz; sólo tiene que escribir instrucciones que provoquen que suceda algo, cuando los usuarios intercalan con esos objetos. De esta manera se crean aplicaciones dinámicas con rapidez.

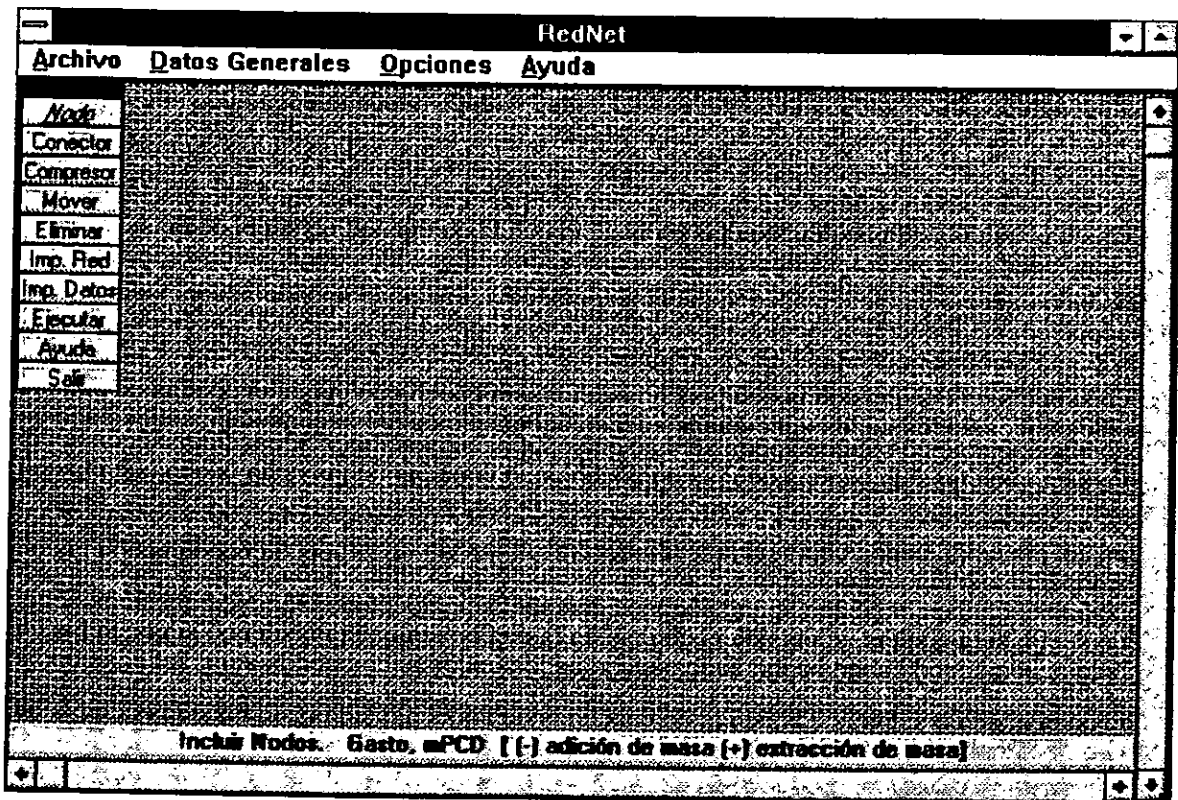
Cuando se conoce la innovadora programación orientada a objetos, así como el ambiente y herramientas de trabajo, el programador puede comunicarse visualmente más que textualmente. La construcción de una aplicación efectiva comienza con un buen diseño y una visión amplia del contenido y propósito de la misma, porque su organización depende de la información que ésta contiene y de cómo se espera que los usuarios actúen.

Hay que recordar que los programas son para que las personas los usen, y no para que los observen, por lo que el proyecto se corre fuera de Visual Basic, simplemente como cualquier otra aplicación Windows.

#### IV. DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CÓMPUTO

A continuación se explican las pantallas de captura que componen al sistema GASNET.

La pantalla principal de GASNET se despliega de la siguiente manera:



En ésta se localiza la barra de menús, así como la barra de herramientas que tienen como función correr un archivo ya registrado o introducir datos de uno nuevo que se requiere analizar, si se desea se puede desplegar el resumen de los datos e incluso pedir una impresión tanto de los componentes gráficos como numéricos, proporcionando las ventajas de cambios en estos mismos para realizar una corrida de comparación. Este proceso se lleva a cabo cuando se despliega la información dentro de la pantalla en forma gráfica, presentándose la red de interés en forma de nodos y conectores, los cuales también se pueden cambiar de lugar o eliminarse. Adicionalmente se presenta una línea amarilla que enuncia las aplicaciones de los botones de la caja de herramientas al ser activadas al pasar la flecha del *Mouse* sobre ellos.

De esta manera los elementos que componen la barra de menús se explican a continuación:

Menú Archivo:

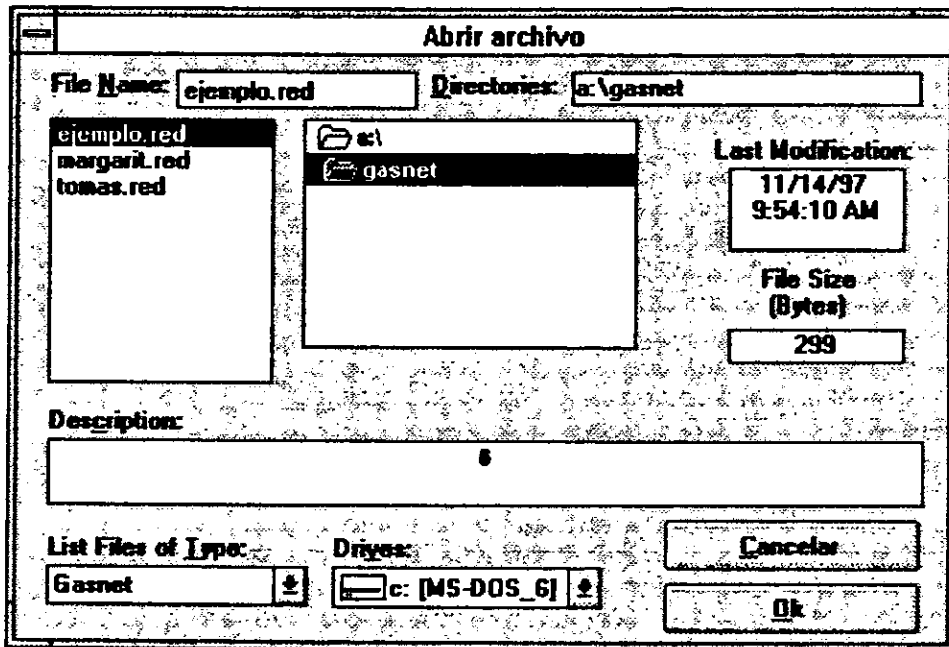
<b>A</b> rchivo
<b>N</b> uevo
<b>A</b> brir
<b>G</b> uardar
<b>G</b> uardar como
<b>I</b> mprimir
<b>S</b> alir
<u>1</u>
<u>2</u>
<u>3</u>
<u>4</u>

Nuevo:

Inicia un nuevo estudio. Por lo cual la barra de procesos permite introducir la información gráficamente como más adelante se explica.

**Abrir:**

Al activarse, aparece la siguiente pantalla:



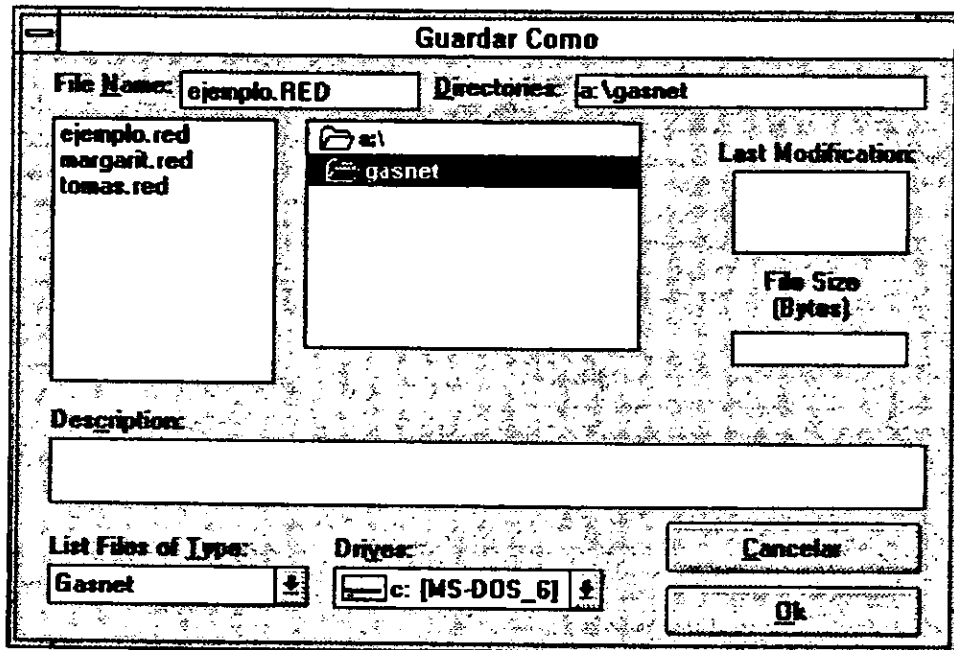
Como se observa, es necesario especificar el nombre del archivo, la ruta donde se encuentra el archivo que se desea abrir junto con la unidad, subdirectorio y tipo de archivo. Además se registra el día y hora de la última modificación que se realizó en el archivo, el tamaño en bytes que ocupa y en la descripción aparece el número de nodos que tiene la red.

**Guardar:**

Este elemento guarda la información que actualmente se tiene en memoria, en el archivo de trabajo. Si no se tiene un archivo abierto, o el archivo actualmente en uso no ha sufrido ningún cambio, esta opción permanece deshabilitada. Al efectuar algún cambio en la información automáticamente se activa.

**Guardar Como:**

Se debe mandar llamar cuando se desea guardar un archivo con otro nombre o para darle un nombre a un archivo nuevo.



Como lo indican las cajas de texto, se requiere elegir la unidad, subdirectorio, tipo de archivo y se teclea el nombre del archivo que contiene la simulación o se elige uno ya existente para sobrescribirlo, si no se cuenta con un archivo abierto.

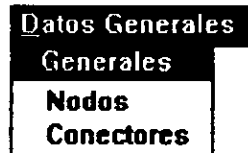
**Imprimir:**

Se requiere en el caso de desear imprimir datos y/o resultados.

*Salir:*

Permite abandonar GASNET.

*Menú Datos Generales:*



*Generales:*

A screenshot of a dialog box titled 'Datos Generales'. It contains several input fields with the following values:
 

- Eficiencia de Flujo: 1
- Temperatura (Fahrenheit): 95
- Densidad Relativa: .65
- H2S: 0
- CO2: 0
- N2: 0

 At the bottom of the dialog box is a button labeled 'Regresar'.

En esta pantalla se establece la información general de la red. Ésta se compone de:

**1. Eficiencia de Flujo**

La rugosidad de las tuberías depende del proceso empleado en su fabricación, su grado y tamaño, así como del uso, lo cual impide determinar su valor exacto en forma práctica provocando que los gastos calculados mediante las correlaciones raramente concuerden con los medidos. Para compensar esta imprecisión se introduce en los cálculos la eficiencia de flujo. El programa automáticamente asigna un valor de uno, pero dependiendo del problema se debe introducir



el correspondiente a la fracción (o porcentaje) del gasto total calculado al manejado realmente en la tubería.

- 2. **Temperatura** Definida como la temperatura media de flujo en toda la red de ductos.
- 3. **Densidad Relativa** Se debe proporcionar el valor de la densidad relativa promedio del gas que se transporta.
- 4. **H<sub>2</sub>S** De detectarse ácido sulfhídrico en el gas, especificar su porcentaje.
- 5. **CO<sub>2</sub>** Al igual que el anterior, el bióxido de carbono se da en porcentaje.
- 6. **N<sub>2</sub>** Finalmente, también el porcentaje de nitrógeno debe entrar como dato.

*Nodos:*

Datos de los Nodos		
Nodo	Presión	Gasto
1	7750.	18000.0
2	7770.	0.0
3	7800.	0.0
4	7850.	0.0
5	850.	7-13000.
6	900.	7-5000.

Las unidades son pies cúbicos por día, sfc/día, y. psia para el gasto y presión respectivamente.

Esta ventana despliega información de cada uno de los nodos que se introducen en la red, las columnas indican el número, la presión y el gasto del nodo, respectivamente en ese orden. Los signos de interrogación señalan cuál es la incógnita de cada uno de ellos.

*Conectores:*

Datos de Conectores			
i	j	Diámetro pulgadas	Longitud Kilometros
1	2	10.0	30.0
2	3	8.0	15.0
2	4	6.0	10.0
3	4	6.0	6.0
3	5	4.0	5.0
4	6	4.0	3.0

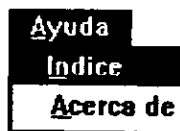
Este es el resumen de los conectores, se especifican los datos proporcionados de longitud y diámetro de cada uno de ellos.

Menú Opciones:

Opciones  
Barra de Herramientas

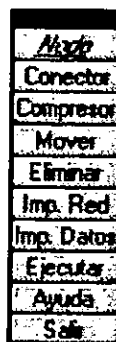
Este menú tiene la función de ocultar o restablecer nuevamente la caja de herramientas para comodidad del usuario a la hora de acceder gráficamente el sistema de tuberías.

Menú Ayuda:



Si se elige la opción "Índice", se activa la ayuda del GASNET. Pero de lo contrario "Acerca de" desplegará información de los desarrolladores del sistema.

Ahora describiremos de qué forma se crea gráficamente la red en la pantalla y el establecimiento de sus datos en las diversas ventanas. Por lo tanto la barra de herramientas es de vital importancia para este hecho, como a continuación se define:



Antes de describir cada uno de sus componentes, cabe señalar que en la línea amarilla, al fondo de la pantalla principal aparece una breve explicación acerca de la función de cada uno de los comandos de esta caja.

**Nodo:**

Este comando activa la pantalla para colocar con el *Mouse* los nodos de la red, es importante señalar que automáticamente el programa los enumera apareciendo el número correspondiente al centro de cada nodo. Simplemente hay que dar un *click* en el lugar de la pantalla en que se desea colocar el nodo.

**Conector:**

Después de que se han introducido todos los nodos del sistema, al activar este botón podemos realizar las conexiones entre nodos de la red; tan sólo damos un *click* en el nodo del que se parte y éste cambiará a color amarillo, indicando que se eligió, después daremos otro *click* en el nodo al que se va a conectar y automáticamente aparecerá una línea con un pequeño cuadro al centro entre los nodos que se seleccionaron.

**Compresor:**

Esta opción nos permite colocar un gráfico que representa los compresores de la red.

**Mover:**

Este botón nos permite cambiar la posición de los nodos de la red. Al señalar el nodo éste cambia a color verde e indicaremos con el *Mouse* la nueva localización del nodo y aparecerá con su número original pero en la nueva posición.

**Eliminar:**

En caso de desear cambiar la información, esta herramienta borra el nodo o conector que se requiere eliminar.

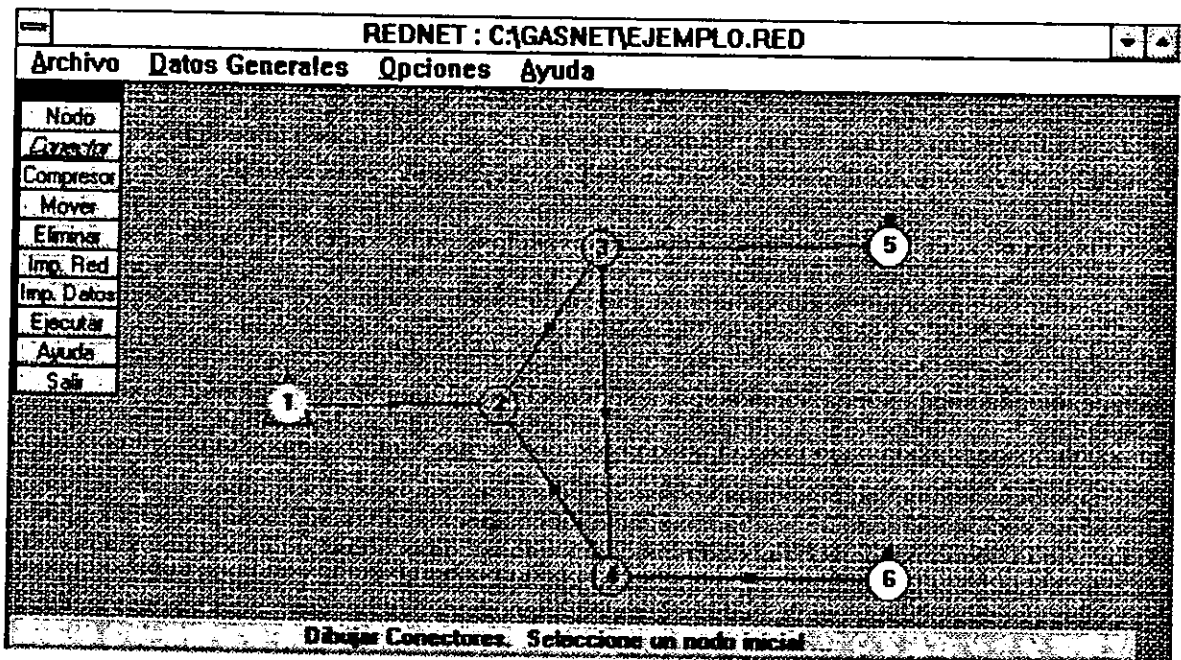
**Imp. Red:**

Comando diseñado para obtener una impresión gráfica de la red.

**Imp. Datos:**

En este caso lo impreso contiene: un resumen de la información en general de la red; así como los nodos con sus respectivas presiones y gastos y los conectores con sus diámetros y longitudes.

Ya que se ha proporcionado toda la información gráfica de la red como se aprecia a continuación:



se selecciona nuevamente Nodos y al dar un click en los nodos aparece la siguiente pantalla:

Nodo : 2

Gasto(sfc/día) 0

Presión (psia) 770

Incógnita

Gasto

Presión

Cancelar OK

Por medio de esta pantalla se registran los datos de los puntos donde terminan los elementos del sistema, ó en donde se extrae ó adiciona gas al sistema. La información que se captura es la siguiente:

### 1. Gasto

En caso de tratarse de un punto de entrega el dato numérico será positivo y automáticamente el color del nodo será amarillo; de lo contrario si se trata de un pozo, el valor es negativo y el color del nodo se toma blanco. Las unidades en que se manejan son pies cúbicos por día sfc/día.

### 2. Presión

Si la información es un dato real, se introduce el dato en la caja de texto; de no tenerse, se debe de suponer tomando en cuenta los datos cercanos y las unidades que se manejan son psia.

### 3. Incógnita

En esta caja de opción es necesario especificar cuál de los datos proporcionados es la incógnita por lo que sólo se da un click en la opción correspondiente.

Al igual que la información para los nodos, en los conectores se vuelve a activar el comando *conector* para introducir los datos correspondientes, por lo que se da click en los cuadros intermedios de los conectores, desplegándose la siguiente ventana:

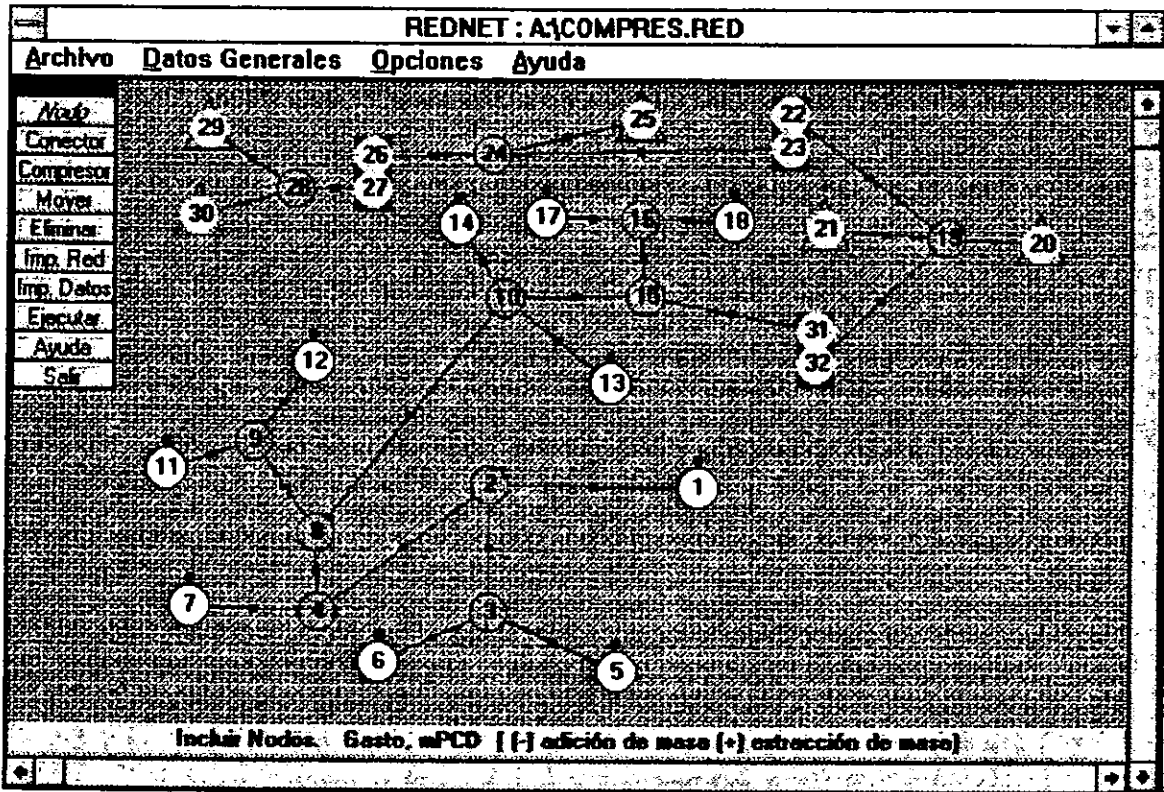
The image shows a window titled "Conector 1 - 2" with three input fields and a button. The fields are labeled "Longitud (Km.)", "Diametro (Pg.)", and "Gasto (Mft3/d)". The values entered are 30, 10, and 12644.8. There is a button at the bottom with the text "OK".

Label	Value
Longitud (Km.)	30
Diametro (Pg.)	10
Gasto (Mft3/d)	12644.8

Los valores correspondientes a las cajas de texto, son:

1. Longitud                      Tamaño del tramo de tubería que conforma el conector, el cual une a los nodos especificados en el título de la ventana. Las unidades de están en Km.
2. Diámetro                      Este valor se proporciona en pulgadas y también debe ser el correspondiente al conector indicado en el título.

En el ejemplo anterior se tiene una red compuesta tan sólo por tuberías, como conectores en el caso de tenerse compresores, como se observa a continuación:



Si el tipo de conector es un compresor, el gráfico corresponde a dos nodos juntos en color rojo y fondo gris, de los cuales, el de abajo representa la entrada de gas correspondiente al subíndice  $i$  y el de arriba, la salida con subíndice  $j$  y las ventanas activadas al consultar los datos, son:

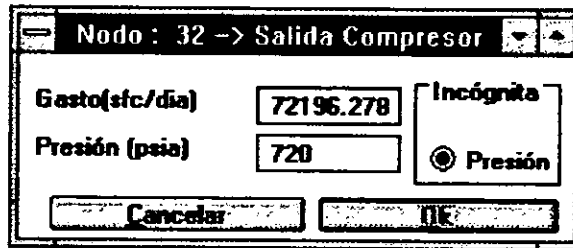
Nodo : 31 -> Entrada Compresor

Potencia (Hp)	1250
P. Succión (psia)	600

Cancelar OK

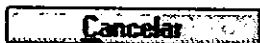


En la cual se proporciona la potencia del compresor en Hp's y la presión de succión en psia. Y para la salida:



donde se presenta la presión de descarga.

En estas ventanas encontramos botones que llamamos BOTONES DE CONFIRMACIÓN, los cuales son :



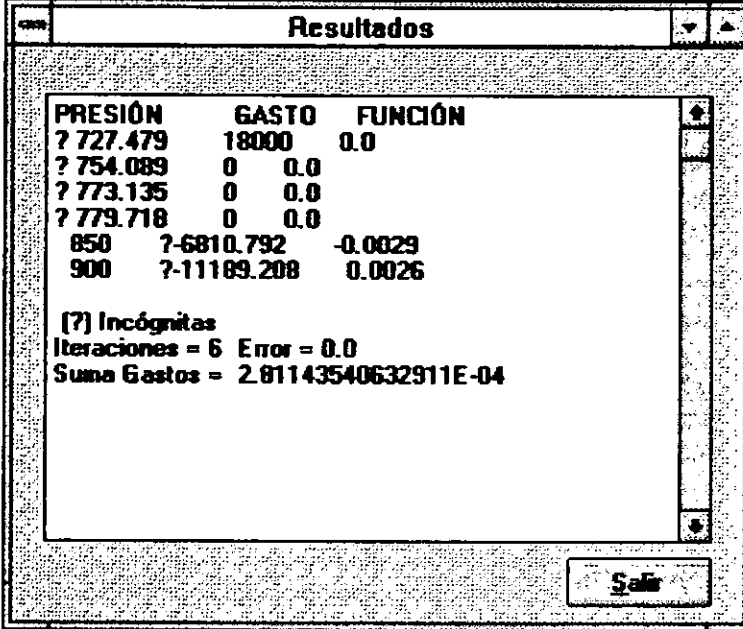
Permite regresar el control a la pantalla anterior, sin procesar.



Este botón es equivalente al comando regresar y tienen la característica de continuar con la captura y/o proceso.

### **Ejecutar:**

Al término de la captura de la información, ya se tiene la disposición de realizar los cálculos, y el comando ejecutar se activa para obtener los resultados, como se muestra :



The screenshot shows a window titled 'Resultados' with a table of data and summary statistics. The table has three columns: PRESIÓN, GASTO, and FUNCIÓN. The first four rows show values with a question mark, indicating unknowns. The last two rows show values for 850 and 900. Below the table, there are summary statistics: [?] Incógnitas, Iteraciones = 6, Error = 0.0, and Suma Gastos = 2.81143540632911E-04. A 'Salir' button is located at the bottom right of the window.

PRESIÓN	GASTO	FUNCIÓN
? 727.479	18000	0.0
? 754.089	0	0.0
? 773.135	0	0.0
? 779.718	0	0.0
850	?-6810.792	-0.0029
900	?-11189.208	0.0026

[?] Incógnitas  
Iteraciones = 6 Error = 0.0  
Suma Gastos = 2.81143540632911E-04

Salir

Esta ventana despliega los valores de las presiones y gastos que se buscan, mismas que se distinguen por el signo de interrogación, el número de iteraciones necesarias para llegar a ellos, así como el error calculado debido al método de solución y la suma total de gastos, el cual debe de ser cero o muy cercano para respetar el principio de conservación de masa en flujo en régimen permanente.

**Ayuda:**

Muestra una pantalla con las instrucciones de uso de los botones descritos anteriormente.

**Salir:**

Termina la sesión del simulador GASNET en cualquier momento en que se necesite.

## V. APLICACIONES DE CAMPO.

Este capítulo describe varias de las corridas realizadas en el simulador "GASNET", las cuales respaldan la veracidad de todos los atributos mencionados acerca de la funcionalidad del programa. En general, se proporcionan las condiciones iniciales en lo que se refiere a las presiones y gastos, los datos de los diámetros y longitudes de las tuberías de la red, así como los caballos de fuerza de los compresores, en el último caso, y se plantea el problema a tratar en cada uno de los ejemplos. Finalmente, se presentan los resultados del simulador con la información original e incluso se hacen modificaciones a la red para el análisis de los pronósticos, con el objeto de escoger las mejores opciones económicas. De esta manera, a continuación se presenta el examen completo de los modelos:

### V.1. Ejemplo.

El caso está constituido por una red de recolección y distribución de gas con 2 pozos productores, un punto de entrega y el conjunto de tuberías con la conformación presentada en la Figura V.1.; el archivo de datos corresponde a EJEMPLO.RED del diskett de aplicación.

Planteamiento del problema:

Dada la presión en la cabeza de los pozos A y B y el volumen que se requiere entregar en el punto C:

- a) ¿ A qué presión se entregará este volumen?
- b) ¿ Qué volumen aporta cada pozo?
- c) ¿ Qué gasto pasará a través de cada línea?

Este sistema consiste de 6 tuberías, 2 pozos y un punto de entrega; representándolo en forma de nodos, nos queda:

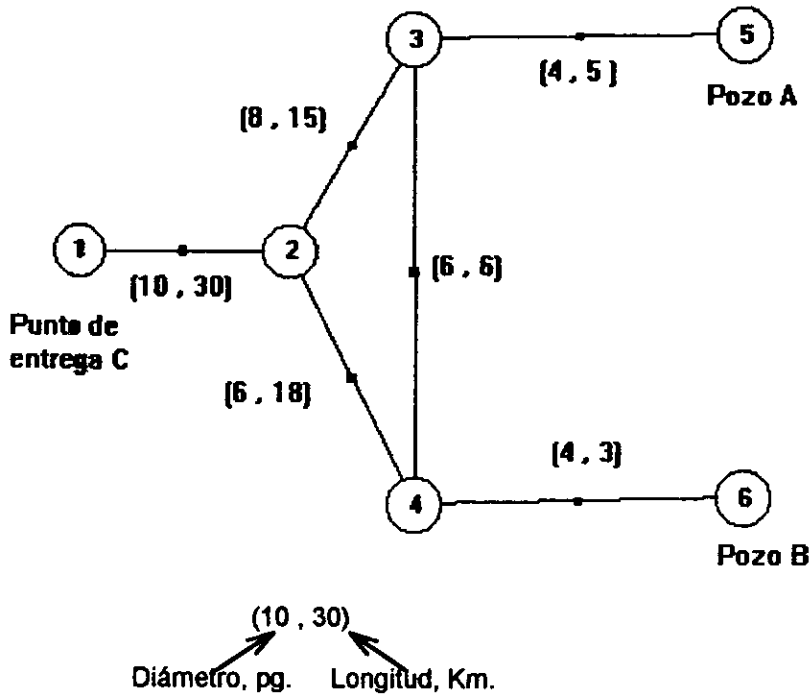


Figura V.1.1. Representación con nodos de la Red.

Las incógnitas y datos se muestran en el siguiente gráfico:

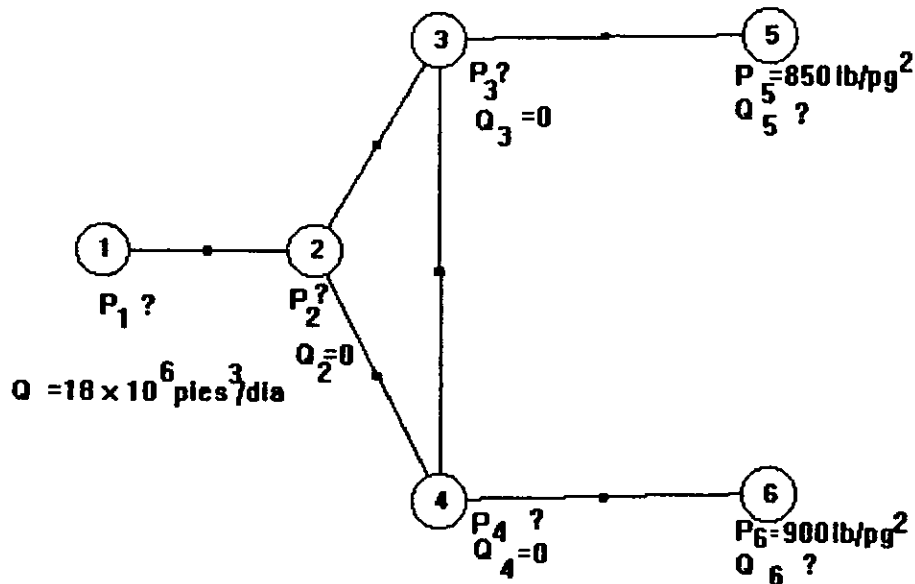


Figura V.1.2. Distribución de Presiones y Gastos en la Red.

Como se nota, el sistema contiene 6 nodos, por lo que se pueden tener 6 incógnitas, siendo éstas la presión en los nodos 1, 2, 3, y 4 y el gasto en los nodos 5 y 6.

Para iniciar el procedimiento iterativo, se asignan los siguientes valores a las incógnitas (?):

Tabla V.1.1.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> / día
1	?750	18000
2	?770	0
3	?800	0
4	?850	0
5	850	?-13000.
6	900	?-5000.

Datos generales de la red:

Eficiencia de flujo = .8  
 Temperatura de flujo = 95 °F  
 Densidad relativa = .65  
 Temperatura base = 60 °F  
 Presión base = 14.7 psia.

Los resultados del simulador, son:

Tabla V.1.2.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> / día	FUNCIÓN
1	? 628.985	18000	0
2	? 676.183	0	0
3	? 709.375	0	0
4	? 719.149	0	0
5	850	?-7223.583	0
6	900	?-10776.417	0

(?) Incógnitas

Iteraciones = 4 Error = 0.0

Suma Gastos = -9.09494701772928E-12

Una pregunta adicional al problema planteado, es ¿Cuál será la presión en el punto de entrega si se elimina la tubería que va del nodo 3 al 4?

Resultados del simulador:

Tabla V.1.3.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> /día	FUNCIÓN
1	? 590.513	18000	-0.0004
2	? 640.552	0	0.0004
3	? 657.205	0	0
4	? 757.299	0	0
5	850	?-8315.342	0
6	900	?-9684.658	0

(?) Incógnitas

Iteraciones = 4 Error = 0.0

Suma Gastos = -1.45519152283669E-11

Esta última simulación nos permite percibir claramente la utilidad del sistema desarrollado, ya que sin hacer cambios físicos en la red, podemos predecir su comportamiento y elegir la política de explotación que permita maximizar los beneficios económicos.

## V.2. Campo "Las Margaritas".

La red está constituida por 15 nodos de los cuales 8 corresponden a pozos, 2 son puntos de entrega y los restantes son los que simplemente conectan ciertas tuberías. Nuevamente se transporta gas y la distribución se muestra en la Figura V.3, el archivo de datos corresponde a MARGARIT.RED del diskett de aplicación.

Es necesario determinar:

- ¿A qué presión se entregará el gas en los puntos A y B?
- ¿Cuál será el gasto  $Q_i$  y la presión  $p_i$  en cada nodo?

La representación de la red con nodos y conectores, es:

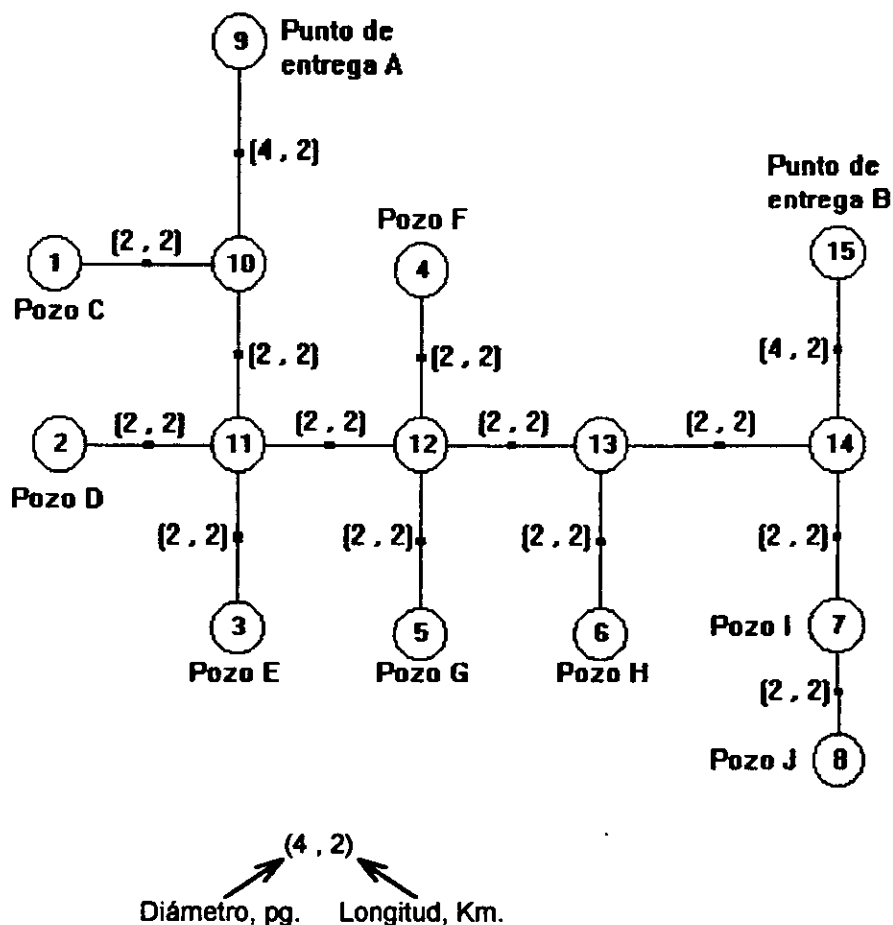


Figura V.2.1. Distribución de diámetros y longitudes en la red.

Como se puede apreciar, se conoce la presión en la cabeza de 6 pozos y el gasto en los 2 restantes. En esta figura se observan las incógnitas y datos del sistema.

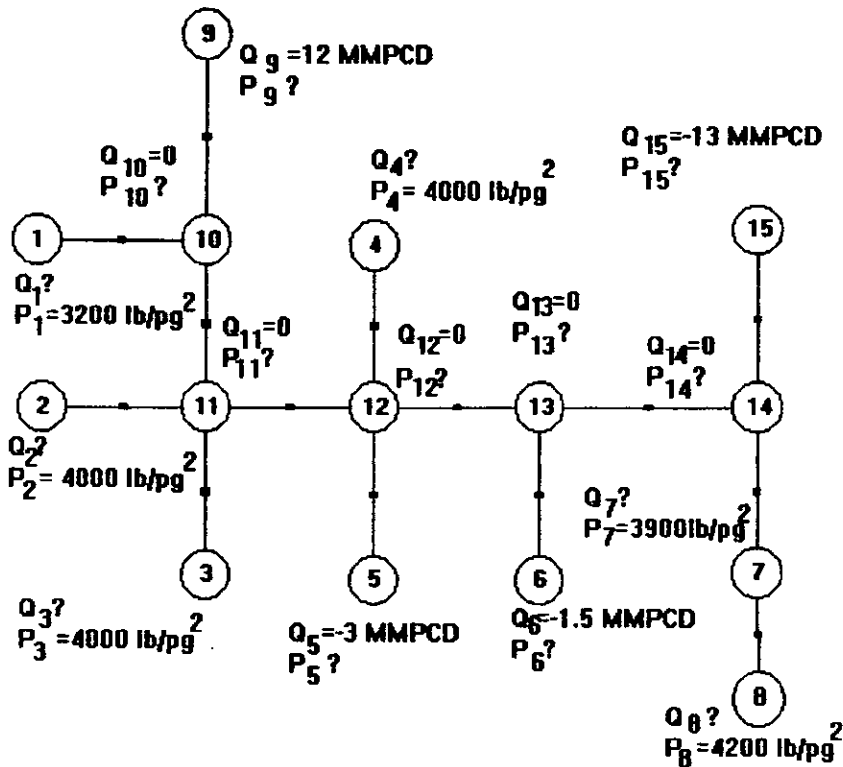


Figura V.2.2. Distribución de gastos y presiones en la Red.

Tomando como base el arreglo de la Figura V.2.1., en el punto A deben entregarse 12 MMPCD de gas y en el B, 13 MMPCD.



Los valores iniciales a considerar, son:

Tabla V.2.1.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> / día
1	3200	?-2900.
2	4000	?-3600.
3	4000	?-3600.
4	4000.	?-3100.
5	?3990.	-3000.
6	?3700.	-1500.
7	3900	?-1200.
8	4200	?-6000.
9	?1000.	12000
10	?3100.	0
11	?3880.	0
12	?3900.	0
13	?3750.	0
14	?3400.	0
15	?1050.	13000

Datos generales de la red:

Eficiencia de flujo = .8  
 Temperatura de flujo = 95 °F  
 Densidad relativa = .65  
 Temperatura base = 60 °F  
 Presión base = 14.7 psia.

Los resultados proporcionados por el simulador, son los siguientes:

Tabla V.2.2.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> /día	FUNCIÓN
1	3200	?-3002.101	0
2	4000	?-3605.546	0
3	4000	?-3605.546	0
4	4000	?-3131.657	0
5	? 3993.152	-3000	0
6	? 3769.294	-1500	0
7	3900	?-1168.659	0
8	4200	?-5986.492	0
9	? 3063.794	12000	0
10	? 3103.047	0	0
11	? 3888.256	0	0
12	? 3915.995	0	0
13	? 3749.002	0	0
14	? 3426.171	0	0
15	? 3384.458	13000	0

(?) Incógnitas

Iteraciones = 6 Error = 0.0

Suma Gastos = 1.45519152283669E-11

Debido al método de Gradientes Conjugados, hay un ahorro sustancial de tiempo, ya que por una parte el número de iteraciones se reduce a la mitad, en comparación con otros métodos, como el de Newton Rapshon. Este método no resuelve toda la matriz de ecuaciones lineales y realiza sólo las operaciones necesarias, por lo cual se acerca con menos iteraciones a la solución.

### V.3. Campo "TOMAS".

El sistema usado para la validación del modelo, se ilustra en la Figura V.3.1., mostrando el arreglo nodal, así como la composición en general que consiste de 47 tuberías, de las cuales sus datos se indican en dicha figura; además, se establecen los 22 pozos de producción de gas y los puntos A y B de entrega. Las Figuras V.3.2 y V.3.3 proporcionan la información de la distribución de presiones y gastos propuestos en la red, respectivamente. El archivo de datos corresponde a TOMAS.RED del diskett de aplicación.

Planteamiento del problema:

Se requiere entregar en el punto A un gasto de  $30 \times 10^6$  pies<sup>3</sup>/día de gas, y en el punto B un gasto de  $1.5 \times 10^6$  pies<sup>3</sup> / día. Además, se conoce la presión en la cabeza de 20 de los pozos (indicados en la figura V.3.2). De los dos pozos restantes, 16 y 17, se desea producir una cuota fija ( $3$  y  $1.5 \times 10^6$  pies<sup>3</sup> / día, respectivamente). Se desea determinar:

- a) ¿A qué presión se entregará el gas en los puntos A y B?
- b) ¿Cuál será el gasto que aporte cada pozo?
- c) La presión en los pozos que producen una cuota fija.

Datos generales de la red:

Eficiencia de flujo = .8  
Temperatura de flujo = 95 °F  
Densidad relativa = .65  
Temperatura base = 60 °F  
Presión base = 14.7 psia.

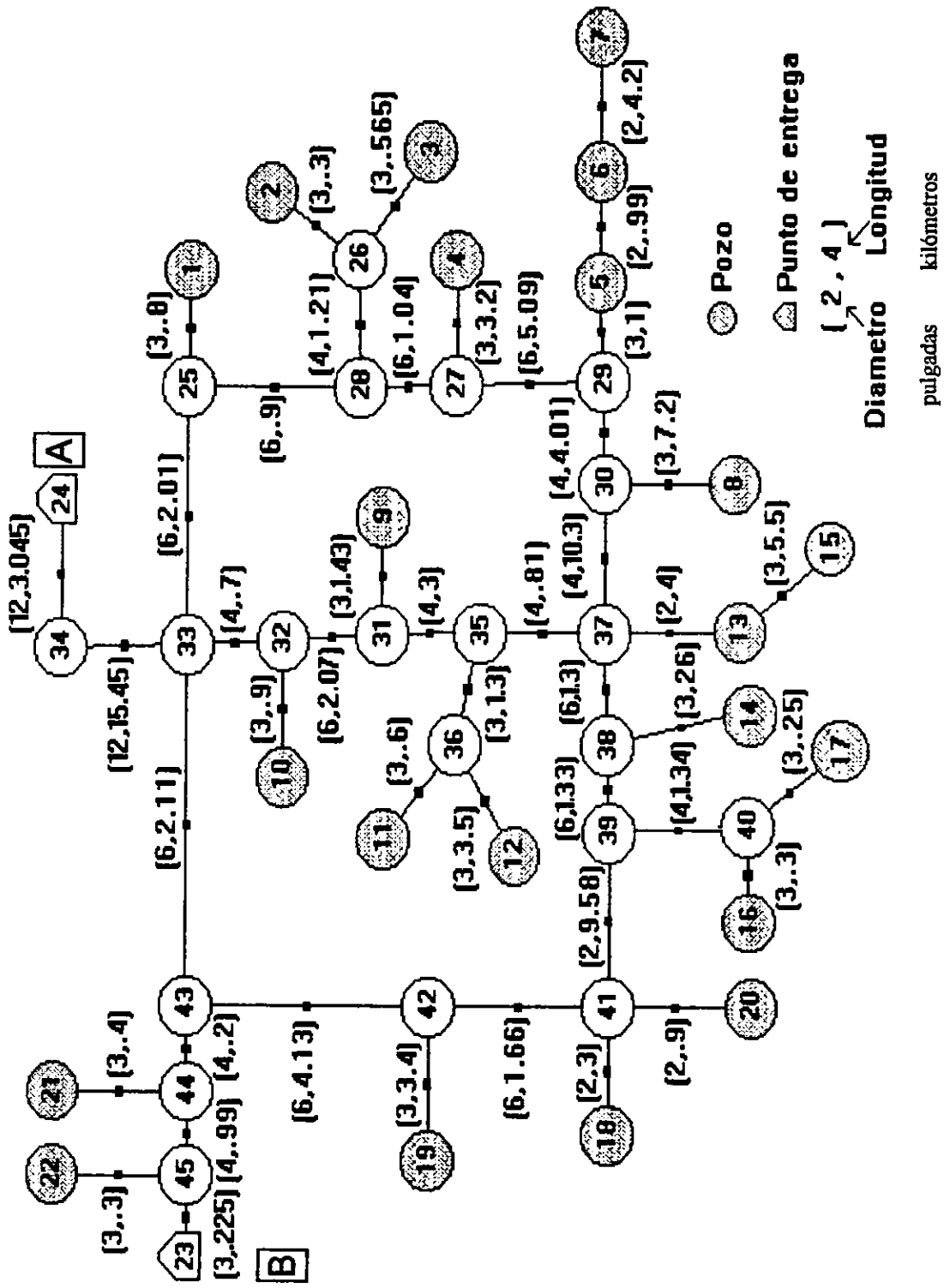


Figura V.3.1. Distribución de los nodos en la Red.

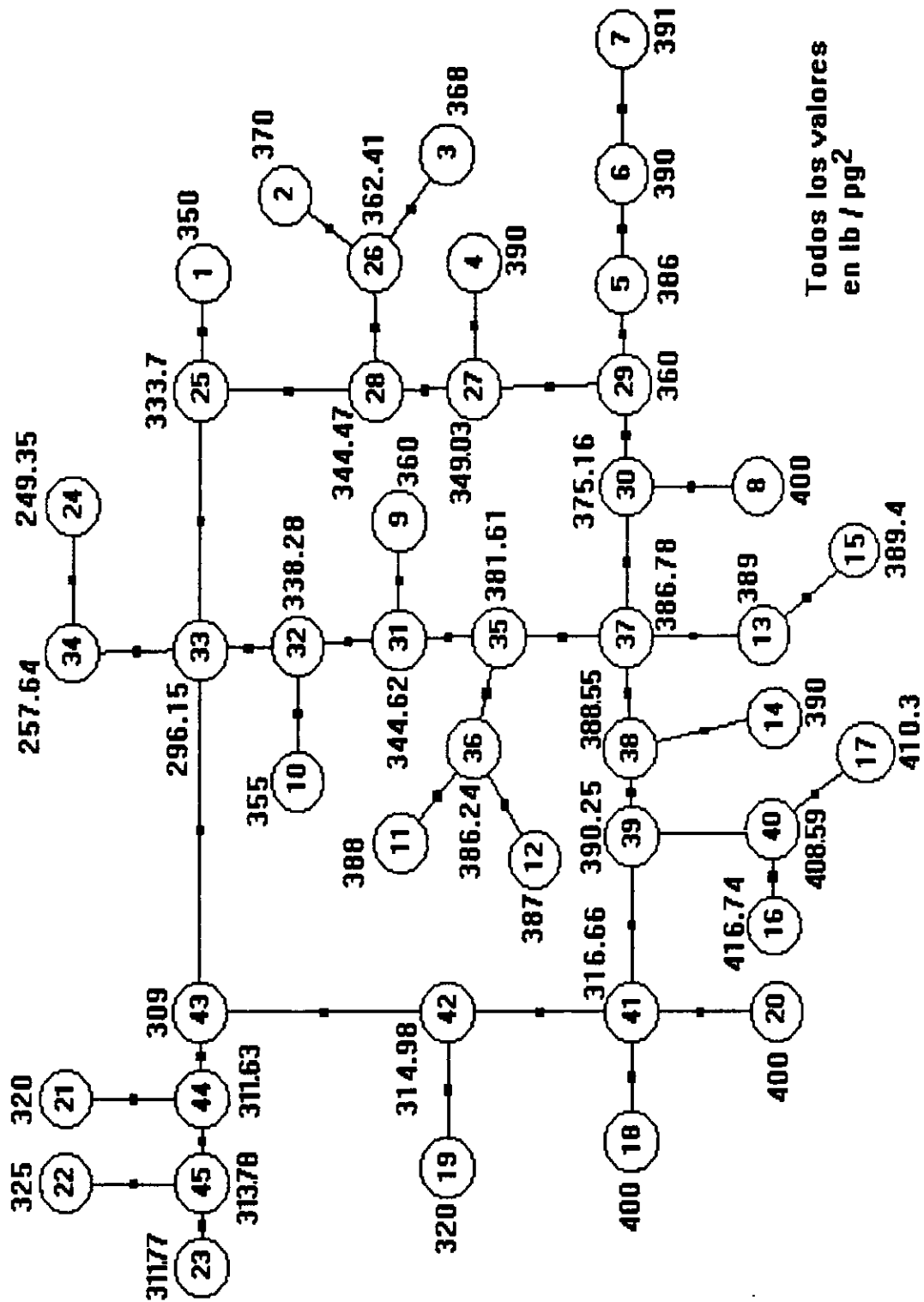


Figura V.3.2. Distribución de Presiones propuestas en la Red.

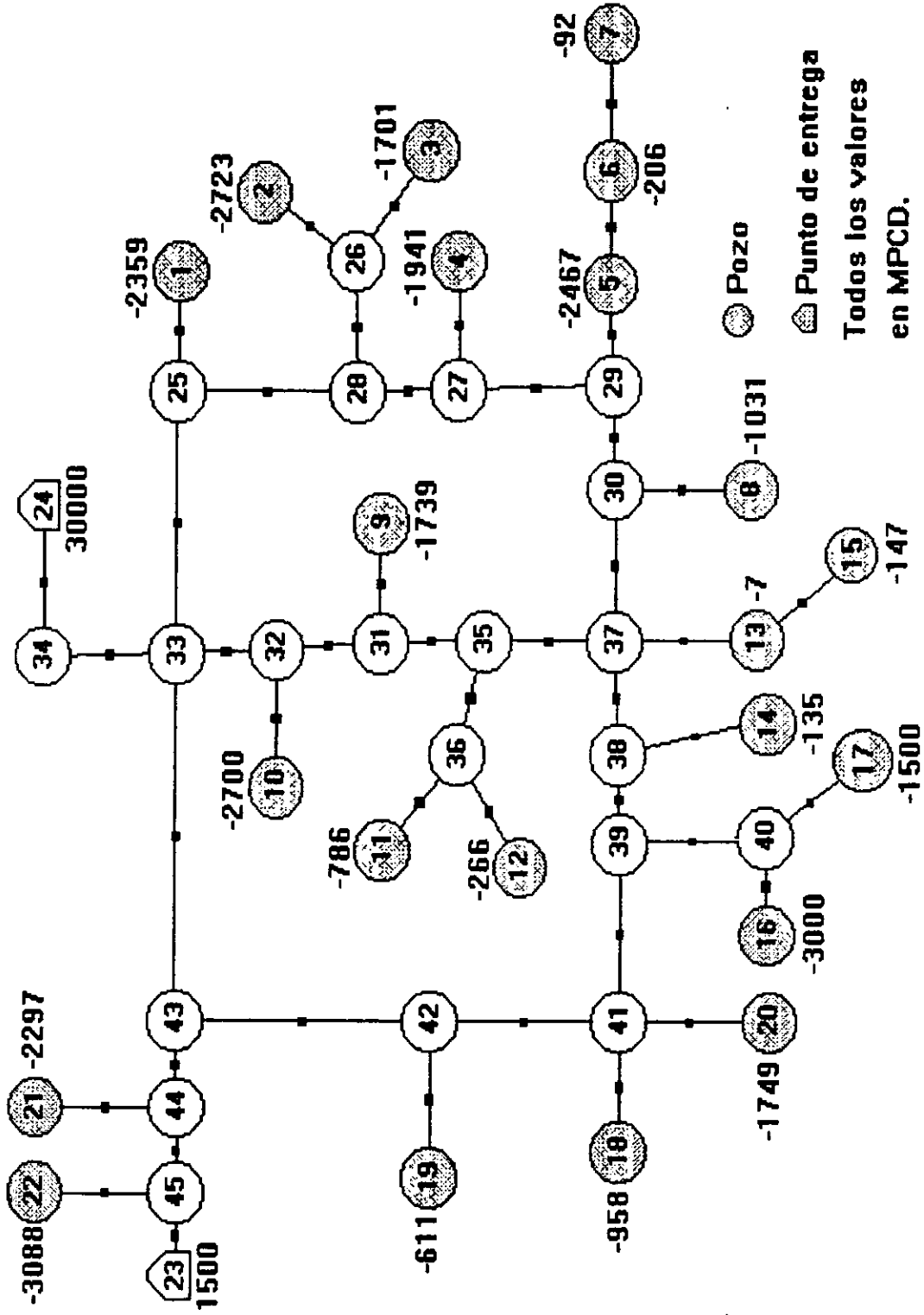


Figura V.3.3. Distribución de Gastos propuestos en la Red.

Los datos iniciales, son:

Tabla V.3.1.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> / día
1	350	?-2359.
2	370	?-2723.
3	368	?-1701.
4	390	?-1941.
5	386	?-2467.
6	390	?-206.
7	391	?-92.
8	400	?-1031.
9	360	?-1739.
10	355	?-2700.
11	388	?-786.
12	387	?-266.
13	389	?-7.
14	390	?-135.
15	389.4	?-147.
16	?416.73	-3000
17	?410.3	-1500
18	400	?-958.
19	320	?-611.
20	400	?-1749.
21	320	?-2297.
22	325	?-3088.
23	?311.768	1500
24	?249.35	30000
25	?333.7	0
26	?362.41	0
27	?349.03	0
28	?344.47	0
29	?360.41	0
30	?375.16	0
31	?344.62	0
32	?338.28	0
33	?296.15	0
34	?257.64	0
35	?381.61	0

(?) Incógnitas

Continuación, Tabla V.3.1.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> / día
36	?386.24	0
37	?386.78	0
38	?388.55	0
39	?390.25	0
40	?408.59	0
41	?316.66	0
42	?314.98	0
43	?309	0
44	?311.63	0
45	?313.78	0

(?) Incógnitas

Resultados de la simulación:

Tabla V.3.2.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> / día	FUNCIÓN
1	350	?-2623.416	0
2	370	?-2573.83	0
3	368	?-1687.449	0
4	390	?-1732.771	0
5	386	?-2188.364	0
6	390	?-230.048	0
7	391	?-74.06	0
8	400	?-867.25	0
9	360	?-1827.802	0
10	355	?-2455.519	0
11	388	?-639.758	0
12	387	-215.731	0
13	389	? 66.034	0.0001
14	390	? 88.543	0
15	389.4	?-120.495	0
16	? 433.984	-3000	0
17	? 424.273	-1500	0
18	400	?-827.306	0
19	320	?-999.959	0

(?) Incógnitas



Continuación, Tabla V.3.2.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> / día	FUNCIÓN
20	400	?-1510.448	0
21	320	-3063.034	0
22	325	?-3517.336	0
23	? 298.63	1500	0
24	? 165.868	30000	-0.0018
25	? 317.856	0	0
26	? 359.376	0	0
27	? 338.582	0	0
28	? 332.692	0	0
29	? 353.233	0	0
30	? 372.673	0	0
31	? 333.125	0	0
32	? 323.831	0	0
33	? 259.62	0	0
34	? 184.607	0	0.0017
35	? 381.345	0	0
36	? 386.179	0	0
37	? 388.483	0	-0.0002
38	? 391.018	0	0.0002
39	? 393.71	0	0
40	? 421.681	0	0
41	? 300.646	0	0
42	? 298.57	0	0
43	? 288.84	0	0
44	? 296.255	0	0
45	? 301.917	0	0

(?) Incógnitas

Iteraciones = 4 Error = 0.0

Suma Gastos = -2.91038304567337E-11

Cambiando el valor de algunos diámetros en la red, como se aprecia en la Figura V.3.4. indicados con un tono más tenue en los valores corregidos, se llega a los siguientes datos con el simulador:

Tabla V.3.3.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> / día	FUNCIÓN
1	350	?-2370.695	0
2	370	?-2527.824	0
3	368	?-1611.752	0
4	390	?-1766.68	0
5	386	?-1536.204	0
6	390	?-742.458	0
7	391	?-239.228	0
8	400	?-905.988	0
9	360	?-1717.303	0
10	355	?-2283.229	0
11	388	?-653.267	0
12	387	?-199.243	0
13	389	? 721.247	-0.0001
14	390	? 93.195	0
15	389.4	?-838.033	0
16	? 416.796	-3000	0.02
17	? 418.696	-1500	0.0002
18	400	?-2185.255	0
19	320	? 634.002	0
20	400	?-3989.712	0
21	320	?-2086.908	0
22	325	?-2794.667	0
23	? 309.864	1500	0
24	? 208.973	30000	0
25	? 327.873	0	0
26	? 361.374		0
27	? 345.358	0	0
28	? 340.249	0	0
29	? 358.052	0	0
30	? 375.194	0	0
31	? 340.014	0	0

(?) Incógnitas

Continuación, Tabla V.3.3.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> / día	FUNCIÓN
32	? 332.28	0	0
33	? 281.742	0	0
34	? 222.795	0	0
35	? 382.41	0	0
36	? 386.415	0	0
37	? 388.772	0	0
38	? 390.94	0	-0.0001
39	? 393.245	0	-0.0002
40	? 416.538	0	-0.0198
41	? 336.057	0	0.0001
42	? 327.101	0	0
43	? 307.976	0	-0.0001
44	? 310.675	0	0
45	? 312.616	0	0

(?) Incógnitas

Iteraciones = 10 Error = 0.001

Suma Gastos = -2.11008846235927E-05

Como se observa, se necesitan más iteraciones para llegar a la solución; sin embargo, el programa es muy estable debido a que los cambios realizados en los datos no provocan resultados erróneos, aún con una desviación de los datos del 50%. Esto aumenta el rango de posibilidades de realizar corridas con diferentes circunstancias, sin preocuparnos por la cantidad de datos que se manejan o las cantidades, tan sólo es necesario respetar la lógica de la información, de acuerdo a las condiciones reales.

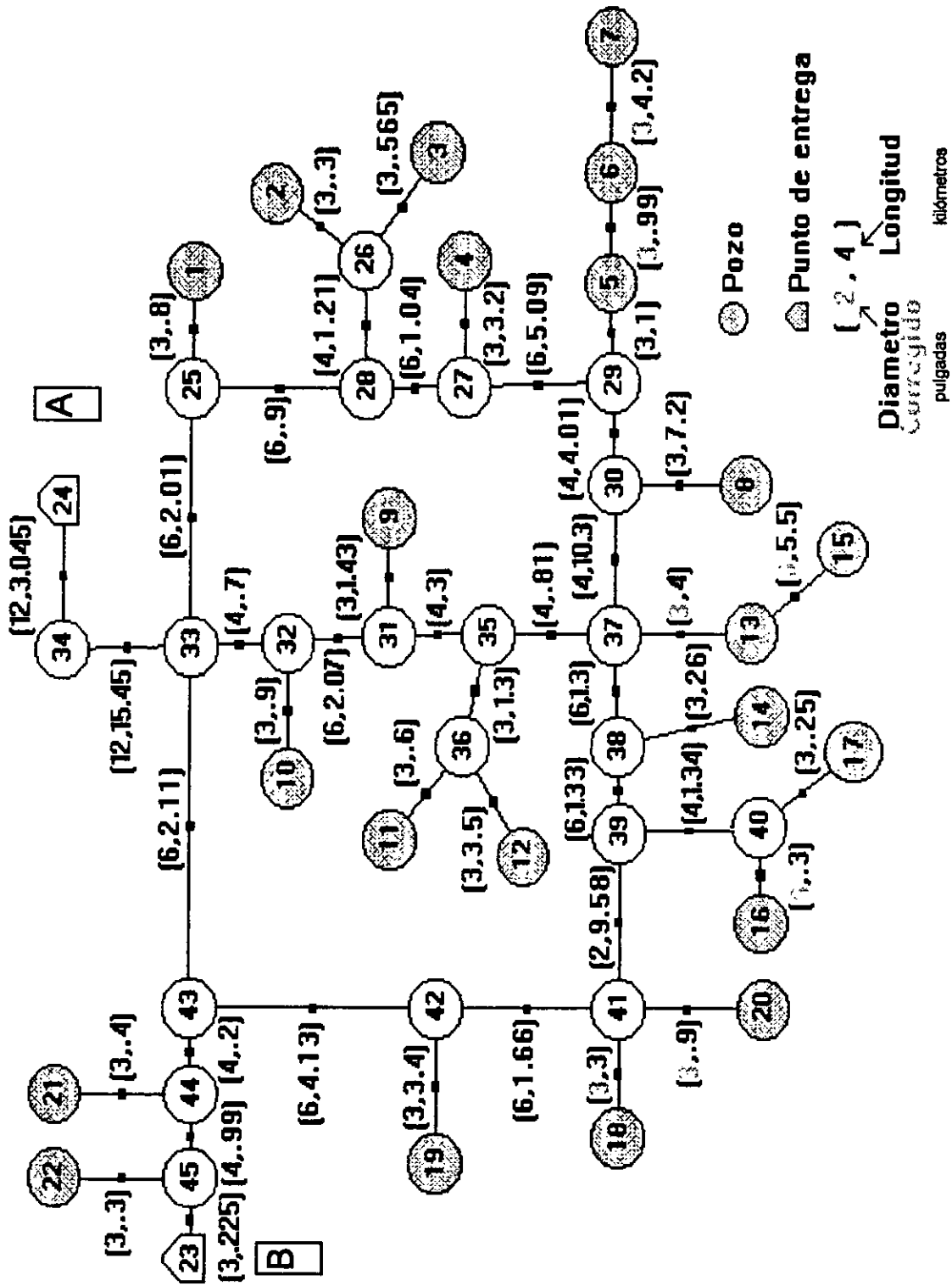


Figura V.3.4. Cambio de diámetros en la Red

## V.4. Ejemplo "Compresor"

Supóngase que se desea diseñar un sistema de recolección y distribución de gas, como el mostrado en la Figura V.4.1., los gastos y presiones establecidos como base de diseño, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla V.4.1.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> / día
1	1067.75?	-5500
2	778.58?	0
3	785.82?	0
4	776.46?	0
5	984.45?	-7200
6	1072.96?	-6800
7	1037.21?	-10300
8	773.52?	0
9	811.41?	0
10	743.74?	0
11	1070.98?	-8600
12	906.08?	-9200
13	835.98?	-9800
14	801.31?	-8000
15	714.19?	0
16	736.07?	0
17	796.21?	-7100
18	817.1 ?	-10700
19	600	1107.02
20	817.43?	83200
21	589.33?	10500
22	585.18?	15300
23	629.39?	0

(?) Incógnitas

Continuación, Tabla V.4.1.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> / día
24	600.06	580.05
25	760.1 ?	57400
26	580.55?	18200
27	606.69?	0
28	598.99	249.55
29	695.96?	39200
30	671.37?	0
31	652.24?	21700
32	645.26?	17500
33	0.0 ?	0

Además de las condiciones de flujo anteriores, se consideran los siguientes parámetros:

Eficiencia de flujo = .8  
 Temperatura de flujo = 95 °F  
 Densidad relativa = .65  
 Temperatura base = 60 °F  
 Presión base = 14.7 lb/pg<sup>2</sup>.  
 Presión de succión = 600 lb/pg<sup>2</sup>.

El sistema se compone de 31 tuberías con valores de diámetros y longitudes propuestos como se muestra en la Figura V.4.2., además de contarse con la presencia de 3 compresores, 10 pozos y 5 puntos de entrega. El archivo corresponde a compr5.red., del diskett de aplicación.

Los resultados obtenidos con el simulador, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla V.4.2.

NODO	PRESIÓN lb/pg <sup>2</sup>	GASTO M pies <sup>3</sup> / día	FUNCIÓN
1	1067.75?	-5500	0
2	778.58?	0	0
3	785.82?	0	0
4	776.46?	0	0
5	984.45?	-7200	0
6	1072.96?	-6800	0
7	1037.21?	-10300	0
8	773.52?	0	0
9	811.41?	0	0
10	743.74?	0	0
11	1070.98?	-8600	0
12	906.08?	-9200	0
13	835.98?	-9800	0
14	801.31?	-8000	0
15	714.19?	0	0
16	736.07?	0	0
17	796.21?	-7100	0
18	817.1 ?	-10700	0
19	600	1107.02?	0
20	817.43?	83200	0
21	589.33?	10500	0
22	585.18?	15300	0
23	629.39?	0	0
24	600.06	580.05?	0.0001
25	760.1 ?	57400	-0.0003
26	580.55?	18200	0
27	606.69?	0	0.0001
28	598.99	249.55?	-0.0001
29	695.96?	39200	0.0002
30	671.37?	0	0
31	652.24?	21700	0
32	645.26?	17500	0
33	0.0 ?	0	0

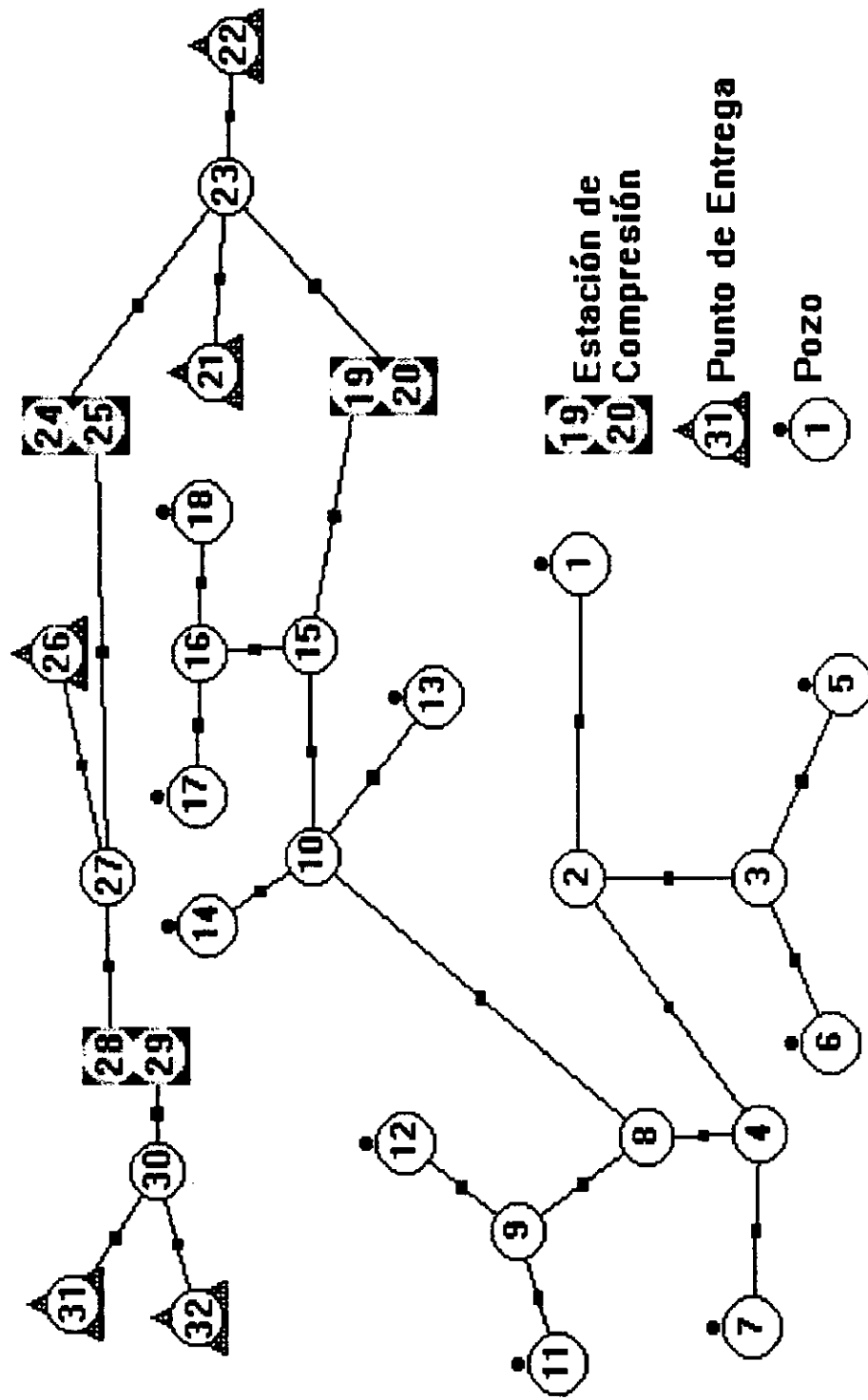
(?) Incógnitas

Iteraciones = 1 Error = 0.001

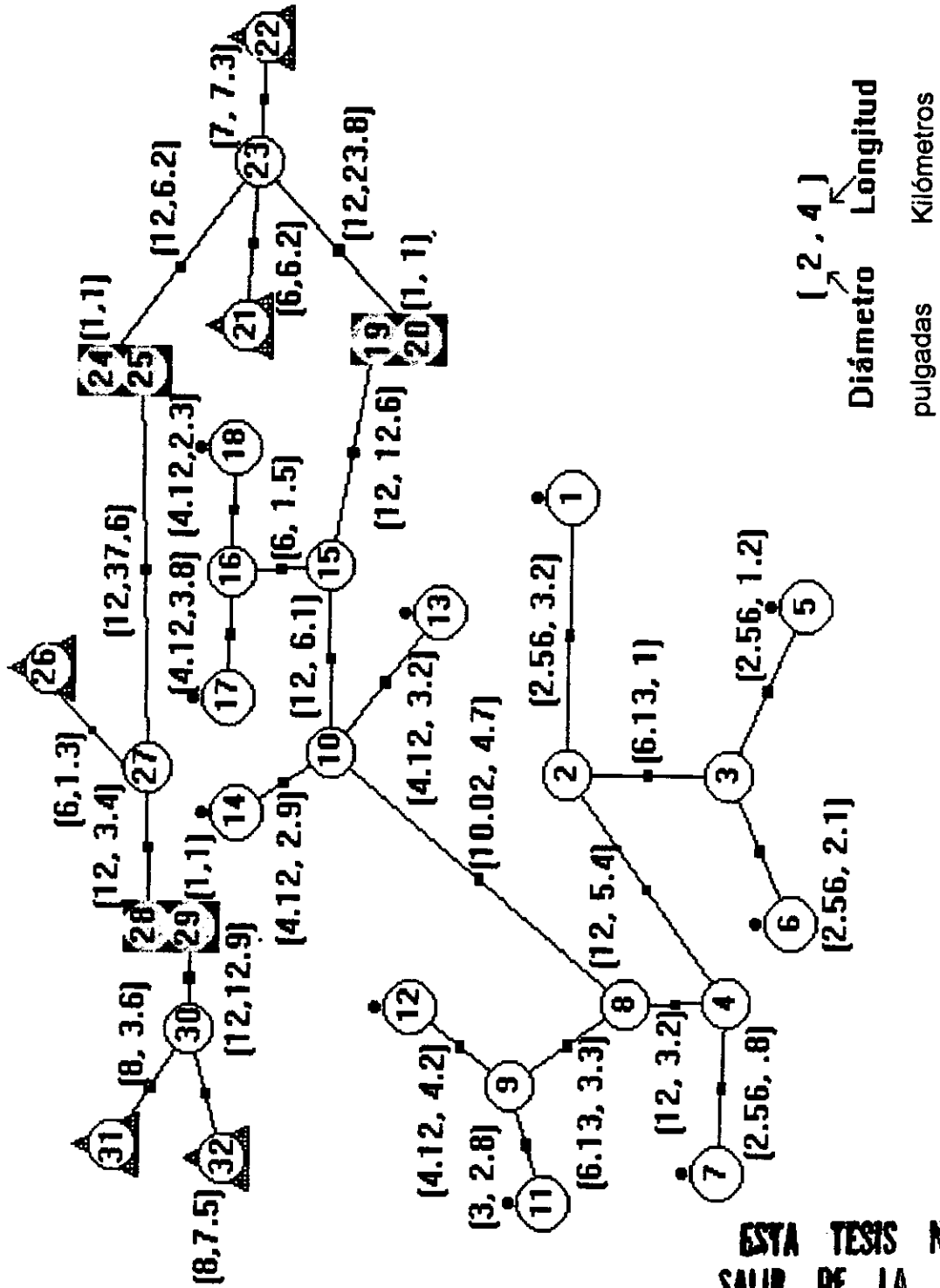
Suma Gastos = 0

Debido a que el problema es teórico, los valores presentados como resultados, son representativos, ya que tanto la potencia de los compresores como los diámetros de las tuberías, se tienen que adecuar a las medidas estándares y comerciales. Sin embargo, esta versión cuantifica a los compresores como una energía adicional al sistema que se puede traducir a pérdidas o ganancias económicas en análisis comparativos de varias corridas, para decidir el diseño más adecuado.





V.4.1. Representación con nodos de la Red.



V.4.2. Distribución de Diámetros y Longitudes de la Red.

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

## VI. CONCLUSIONES

El programa de cómputo propuesto en este trabajo, permite realizar la ingeniería para la optimización con una disminución en el costo de computación y en las horas / hombre.

El programa se realizó con el fin de utilizarse en redes de gas en régimen permanente, no obstante, es posible tomar como base la mayoría de las subrutinas y parte del programa principal, para efectuar lo mismo a uno referente al diseño y análisis de redes de agua o aceite.

Con la técnica propuesta por Stoner, basada en el método de Newton-Raphson, se debía tener extremo cuidado en la manera de establecer los valores iniciales a las incógnitas del sistema, ya que había gran posibilidad de obtener divergencias al tratar de calcular la solución del sistema. Sin embargo, la estabilidad lograda debido a la técnica de Gradientes Conjugados, permite errores hasta del 50 % en las estimaciones iniciales, sin presentarse problemas de divergencia. No obstante, al usar el programa, se deben cuidar los datos fijados y revisar la lógica de la información.

Como se menciona en la teoría, las compresoras se representan por una ecuación de flujo que relaciona el gasto con las presiones, que para aspectos prácticos de cálculo, es suficiente, pero no simula realmente las condiciones de operación de una compresora, por lo que al proporcionar este dato al programa se tiene que considerar que es potencia efectiva sobre el fluido y no potencia nominal.

Finalmente, otra de las bondades que ofrece GASNET, es la facilidad de acceso debido al ambiente Windows, porque la introducción de la red gráficamente, simplifica el trabajo de indicar el tipo de información y su localización.

Además, se pueden realizar varias corridas con diferentes datos, modificando sólo aquéllos en los cuales se desea realizar cambios sin necesidad de volver a cargar toda la red, tan sólo se guarda el archivo con un nuevo nombre.

La disminución en costo y tiempo redundará en la posibilidad de analizar un mayor número de opciones de diseño, lográndose con esto una mejor selección de diseño.

Es conveniente hacer notar que el programa propuesto, no efectúa el diseño óptimo de una red de gas, sin embargo, puede desarrollarse un programa de optimización tomando como base éste programa, incluyendo el aspecto económico.

NOMENCLATURA

$C_p$	Calor específico a presión constante.
$C_v$	Calor específico a volumen constante.
CTE	Constante.
$d_{ij}$	Diámetro de la línea, pg que conecta los nodos i, j.
$dp$	Diferencial de presión.
E	Factor de eficiencia.
G	Constante de la aceleración gravitacional, 32.2 pie/seg <sup>2</sup> .
Hp	Potencia, hp.
k	Relación de Calores Específicos, $C_p/C_v$ @ de Presión y Temperatura de succión.
$L_{ij}$	Longitud de la línea, km que conecta los nodos i, j.
$P_b, T_b$	Presión y Temperatura a condiciones base por especificación de 1 MMcfd de gas.
$P_i$ y $P_j$	Presión, lb/pg <sup>2</sup> en el nodo i, j.
$P_2$	Presión de descarga, psia.
$P_1, T_1$	Presión y Temperatura de succión, psia, °R.
PM	Peso molecular lbm/lbmol.
$P_{pc}$	Presión pseudocrítica, lb/pg <sup>2</sup> .
$P_{pr}$	Presión pseudo-reducida.
Q	Flujo de gas, MMPCD.
$q_{ij}$	Gasto de gas, pies <sup>3</sup> /día.
T	Temperatura media de la red, °F.
$T_{pc}$	Temperatura pseudocrítica, °F.
t	Recíproco de la temperatura pseudo-reducida, $T_{pc} / T$ .
V	Volumen, pie <sup>3</sup> /min.
W	Trabajo.
Y	Densidad reducida.
$Z_i$ y $Z_j$	Factores de desviación del gas @ $P_i$ y $P_j$ .
$Z_1$	Factor de supercompresibilidad del gas a condiciones de succión.
$\gamma_{gr}$	Densidad relativa del gas libre (aire=1.000).

## BIBLIOGRAFÍA

### LIBROS

1. Chi U. Ikoku, Natural Gas Engineering, PennWell Books, Tulsa, 1980.
2. José Antonio Ruiz García, Apuntes de la Asignatura de Técnicas Avanzadas de Programación, Tesis profesional, Asesor Néstor Martínez Romero, F.I. UNAM 1993.
3. Joseph Lipka, PH. D., Computaciones Gráficas y Mecánicas, Edit. CECSA, México, Nov. 1972, Decimaprimera impresión.
4. Kenyon Brown, Introducción a la Programación de VISUAL BASIC, Edit. LIMUSA, GRUPO NORIEGA EDITORES, México D.F., 1992.
5. William H. Press, William T. Vetterling y Saul A. Teukolsky, Numerical Recipes in Fortran, The Art of Scientific Computing, Second Edition, Cambridge University Press 1992.
6. Ruben Mejía Velasco, Cálculo de Potencia de Compresoras y Diámetros de tuberías de Sistemas que transportan gas , Tesis profesional, Asesor Francisco Sánchez Arredondo, F.I. UNAM 1982.
7. S.S. RAO, Optimization Theory and Applications, Deptt. of Mechanical Engg. San Diego State University, San Diego, USA., WILEY EASTERN LIMITED, 1984.
8. Tomas R. Cut H. Berth, Optimization Using Personal Computer with Applications to Electrical Networks, Wiley Interscience publication, Dallas Texas 1986.
9. Francisco Garaicochea Petirena, Apuntes de Transporte de Hidrocarburos, F.I. UNAM 1983.

## REVISTAS Y PROYECTOS

10. González Ana B. y Ruiz Gustavo A., "Desarrollo de un Modelo para Simular y Optimizar la Operación de las Estaciones de Compresión", Instituto Mexicano del Petróleo, proyecto CBO-3727, informe final, Subdirección de Tecnología de Explotación, División Producción, Agosto 1992.
  11. Ives George, Jr., "Pipe Line Activity Expected to Maintain Current Levels Throughout 1990s", Pipe Line Industry, Noviembre 1993.
  12. Ives George, Jr., "Activity Show Small Increase with Future Plans Showing Strong Outlook", Pipe Line Industry, Noviembre 1994.
  13. Ives George, Jr., "Pipelining Shows Slight Increase with '90s Outlook Remaining High", Pipe Line Industry, Noviembre 1995.
  14. Lines, L.R. and Treitel, Tutorial: "A Review of Least-Squares Inversion and Its Application to Geophysical Problems", Geophysical Prospecting 32, 159-186, Tulsa, Mayo 1983.
  15. Limón Tomás H.: "Transporte de Gas en Régimen Permanente". Instituto Mexicano del Petróleo; proyecto 341 A, Publicación No. 80BH/290A, Subdirección de Tecnología de la Explotación, 1980.
  16. Stoner Michael A.: "Steady-State Analysis of Gas Production, Transmission and Distribution Systems", Paper SPE 2554, presented at SPE 44th Annual Fall Meeting, Denver, Colo., Sept. 28-Oct 1, 1969
  17. Stoner Michael A.: "Sensitivity Analysis Applied to a Steady-State Model of Natural Gas Transportation Systems", American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., Abril 1972.
-

## APÉNDICE A

### Fórmulas Empíricas con Datos Experimentales:

En investigaciones científicas o técnicas consideramos a menudo la observación o medida de dos cantidades, en nuestro caso, manejamos el peso molecular (PM) contra la relación de capacidad calorífica (K). Los resultados de una serie de medidas de las dos cantidades bajo condiciones semejantes, se presentan generalmente en forma de tabla.

El hecho de que pueda trazarse cualquier número de curvas que pase muy cerca de los puntos marcados nos induce a sospechar que puede existir alguna relación entre las cantidades medidas, la cual podría representarse matemáticamente por la ecuación de la curva, como se observa en la figura A-1. Ya que las medidas originales, el dibujo de los puntos, y el trazo de la curva son aproximaciones, la ecuación representará sólo aproximadamente la verdadera relación entre las cantidades. Un gran número de fórmulas de ingeniería son empíricas. Tales fórmulas pueden usarse entonces para interpolar, esto es, para calcular el valor de una de las cantidades cuando se da el valor de la otra, dentro del intervalo de valores usado al determinar la fórmula.

Es evidente, de inmediato, que puede trazarse cualquier número de curvas que pasen muy cerca de los puntos marcados, y por tanto, que cualquier número de ecuaciones pueden aproximar igualmente bien los datos. La naturaleza del experimento puede darnos una sugestión sobre la forma de la ecuación que representará mejor los datos. De otro modo, el problema es más indeterminado.

Si el conjunto de datos se representa aproximadamente por una ecuación de la forma  $y=ax^b$ , entonces el trazo de  $(\log x, \log y)$  aproximará una recta.

Es decir, tomando logaritmos en ambos miembros de la ecuación, obtenemos  $\log y = \log a + b \log x$ , y si  $x' = \log x$ ,  $y' = \log y$ , esto se convierte en  $y' = \log a + bx'$ , una ecuación de primer grado en  $x'$  y  $y'$ ; por tanto, el trazo de  $(x', y')$  o de  $(\log x, \log y)$  se aproxima a una recta.

---



Para determinar las constantes a y b de la ecuación de la recta por el método de los mínimos cuadrados procedemos de la forma siguiente:

1. La ecuación que representan las curvas son  $K=a(PM)^b$  para cada una de las diferentes temperaturas.

2. Aplicando logaritmo a ambas partes de la ecuación se tiene

$$\log k = \log a + b \log (PM)$$

3. Aplicando mínimos cuadrados a la ecuación anterior:

$$\sum \log k = n \log a + \sum \log(PM) b$$

4. Para cada una de las curvas de las diferentes temperaturas se cuenta con 18 datos divididos en dos grupos para establecer un par de ecuaciones para cada una de ellas y resolviéndose como un simple sistema de ecuaciones, obtenemos los valores de a y b.

temperatura	ecuación
50	$k = 1.749291142 (PM)^{-0.111958388}$
100	$k = 1.698300877 (PM)^{-0.106308438}$
150	$k = 1.675686123 (PM)^{-0.104406189}$
200	$k = 1.619216908 (PM)^{-0.09736211}$
250	$k = 1.56816472 (PM)^{-0.09114862}$
300	$k = 1.535319419 (PM)^{-0.087399929}$
350	$k = 1.491965508 (PM)^{-0.081999924}$

5. Finalmente, de las ecuaciones anteriores se tabulan y grafican los términos numéricos contra las temperaturas y se ajustan a una recta para obtener la relación general:

$$K = [-0.0009T + 1.7919][PM]^{0.0001T-0.1174}$$

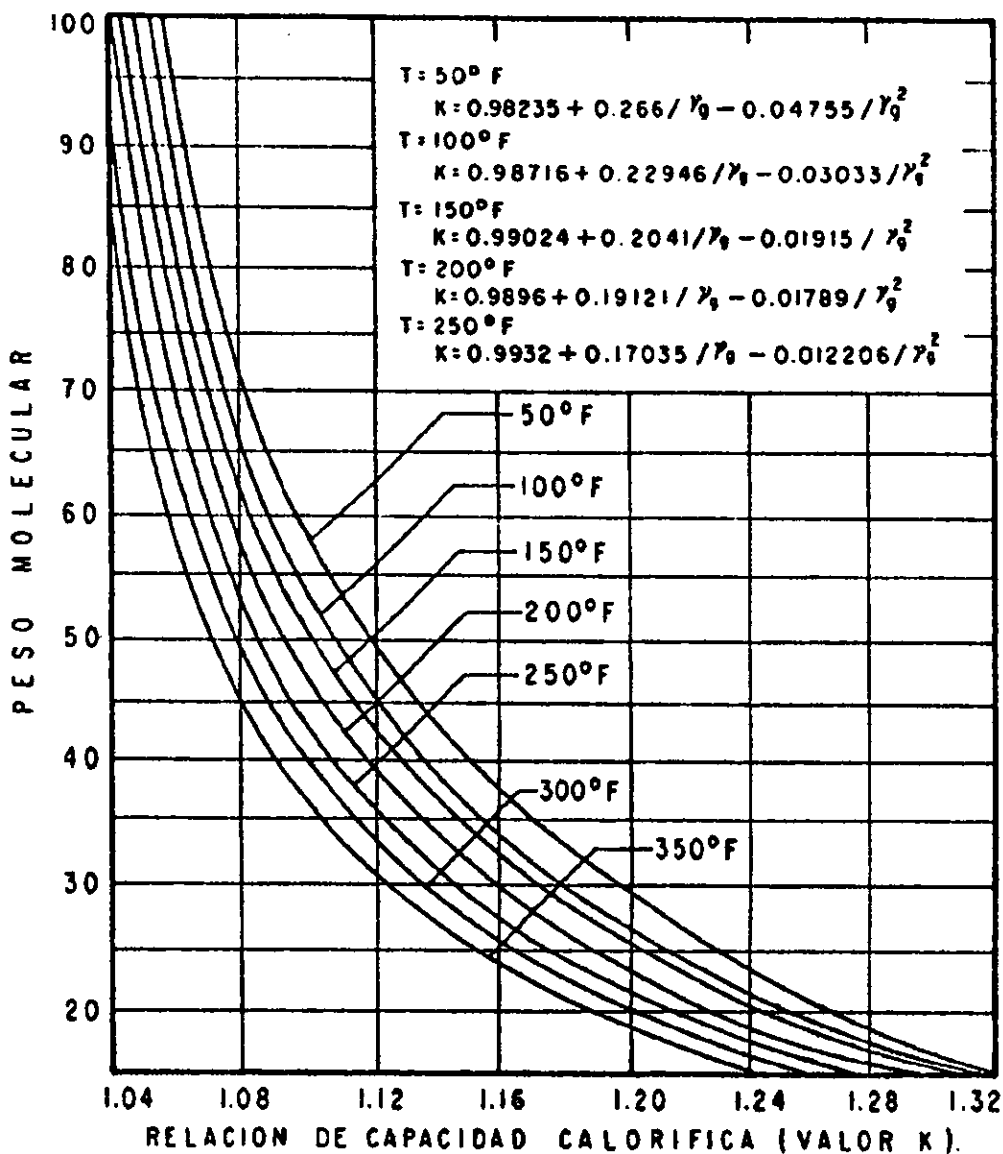


Figura A-1. Aproximación de la Relación de Capacidad Calorífica en Hidrocarburos Gaseosos.

## APÉNDICE B

Hall y Yarborough proponen la siguiente ecuación matemática:

$$Z = \left[ \frac{0.06125 p_{pr} t}{Y} \right] \text{EXP}[-1.2(1-t)^2] \quad (\text{B-1})$$

donde:

$$T_{pc} = 167 + 316.67 \gamma_{gf}$$

$$P_{pc} = 702.5 - 50 \gamma_{gf}$$

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}}$$

$$t = \frac{T_{pc}}{T}$$

Y es la densidad reducida la cual puede ser obtenida como la solución de:

$$F(Y) = -0.06125 p_{pr} t \text{EXP}[-1.2(1-t)^2] + \frac{Y + Y^2 + Y^3 - Y^4}{(1-Y)^3} - (14.7t - 9.76t^2 + 4.58t^3)Y^2 + (90.7t - 242.2t^2 + 42.4t^3)Y^{(2.18+2.82t)} = 0 \quad (\text{B-2})$$

Esta ecuación no-lineal se resuelve para la densidad reducida Y por la técnica Newton-Raphson, descrita a continuación:

1. Hacer una suposición inicial de un parámetro no conocido,  $Y^k$ , donde k es una iteración continua. Para comenzar un valor apropiado de Y es dado por la siguiente relación:

$$Y^k = -0.06125 p_{pr} t \text{EXP}[-1.2(1-t)^2] \quad (\text{B-3})$$

2. Se sustituye dicho valor en la fórmula (B-2) y se obtiene la ecuación no lineal. A no ser que el valor correcto de Y haya sido seleccionado desde un principio, la ecuación (B-2) tendrá un valor diferente de cero para  $f(Y^k)$ .

3. Una nueva estimación mejorada de Y, por ejemplo,  $Y^{k+1}$ , se calcula desde la siguiente expresión:

$$Y^{k+1} = Y^k - \frac{f(Y^k)}{f'(Y^k)} \quad (\text{B-4})$$

donde  $f'(Y^k)$  se obtiene por medio de la derivada de la ecuación (B-2) a  $Y^k$ , o

$$f'(Y) = \frac{1 + 4Y + 4Y^2 - 4Y^3 + Y^4}{(1 - Y)^4}$$

$$-(29.52t - 19.52t^2 + 9.16t^3)Y + (2.18 + 2.82t)(90.7t - 242.2t^2 + 42.2t^3)Y^{(1.18+2.82t)} \quad (\text{B-5})$$

4. Los pasos del 1 al 3 son repetidos n veces, hasta que el error  $(Y^n - Y^{n-1})$  llegue a ser tan pequeño como se impone en la tolerancia.

5. El valor buscado de Y se usa en la ecuación (B-1) para el factor de supercompresibilidad Z.