

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN PROGRAMA PARA EL ANÁLISIS DE FLUIDOS COMPRESIBLES EN REDES DE TUBERÍAS

Tutor Académico: Prof. Juan Ruilova
Tutor Industrial: Ing. Juan Carlos Virgüez

Presentado ante la ilustre:
Universidad Central de
Venezuela
Por el Br. Rosato Mattey, Miguel
Para optar al título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2001

© Rosato Matthey Miguel 2000
Hecho el Deposito de Ley
Deposito legal lft.487200162073

RESUMEN

Rosato Matthey, Miguel

DISEÑO DE UN PROGRAMA PARA EL ANÁLISIS DE FLUIDOS COMPRESIBLES EN REDES DE TUBERÍAS

Tutor académico: Ing. Prof. Juan Ruilova

Tutor industrial: Ing. Juan Carlos Virgües

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2001, 132 p.

1.Redes de Tuberías

2.Fluidos Compresibles

3.Gas natural

El presente proyecto responde a la necesidad de facilitar los cálculos de Ingeniería Mecánica en los proyectos realizados por la Empresa Nouel Ingenieros Consultores C.A., siendo de especial interés, el análisis de flujo compresible en tuberías, debido al incremento de la demanda del gas natural a nivel nacional como primera fuente de energía alternativa del país.

La realización de un programa de cálculo basado en una aplicación de 32 bits, facilita a los ingenieros el cálculo de longitud equivalente, de caídas de presión y diámetros internos, el análisis y diseño de tuberías de gas, el cálculo de potencia y selección de compresores, todo esto adaptado a los requerimientos de diseño de la industria petrolera nacional (Normas PDVSA Nro. 90616.1.024.1993 y Nro. L-TP 1.5.1994).

El resultado de este trabajo se presenta como una alternativa más económica frente a otros paquetes comerciales, brindando soluciones adaptadas a las normas de diseño vigentes en Venezuela, además de incluir todas las validaciones del programa realizado, indicando los márgenes de error obtenido frente a otros simuladores comerciales y frente a sistemas de tuberías operativos en la actualidad.

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Factor de Compresibilidad de los gases naturales	7
Fig. 1.2 Propiedades pseudocríticas de los gases naturales	10
Fig. 1.3 Elemento diferencial de tubería	21
Fig. 1.4 Elemento de red	33
Fig. 1.5 Tipos de camino	34
Fig. 1.6 Gráfica de una red de tuberías de gas	35
Fig. 2.1 Caídas de presión recomendadas para tuberías de gas	50
Fig. 2.2 Red de tuberías de gas	60
Fig. 3.1 Formulario de entrada al programa	73
Fig. 3.2 Formulario de datos	74
Fig. 3.3 Algoritmo para el cálculo de longitud equivalente	76
Fig. 3.4 Formulario de datos para cálculo de tuberías	77
Fig. 3.5 Algoritmo para el cálculo de tuberías	79
Fig. 3.6 Formulario de datos generales. Red de tuberías	81
Fig. 3.7 Formulario de datos de los nodos de la red	82
Fig. 3.8 Formulario de datos de los tramos	83
Fig. 3.9 Algoritmo de calculo de la red	84
Fig. 3.10 Algoritmo de resolución del sistema de ecuaciones	87
Fig. 3.11 Algoritmo de formación de la matriz reducida	90
Fig. 3.12 Formulario de datos. Compresor	91
Fig. 3.13 Algoritmo de cálculo de compresores	92
Fig. 4.1 Resultados obtenidos de longitud equivalente para	

el tramo Nro. 1	98
Fig. 4.2 Resultados obtenidos de longitud equivalente para el tramo Nro. 2	99
Fig. 4.3 Resultados obtenidos de longitud equivalente para el tramo Nro. 3	100
Fig. 4.4 Resultados obtenidos de longitud equivalente para el tramo Nro. 4	101
Fig. 4.5 Resultados obtenidos de longitud equivalente para el tramo Nro. 5	102
Fig. 4.6 Longitud equivalente para los tramos	103
Fig. 4.7 Configuración de una red abierta	105
Fig. 4.8 Red Abierta. Datos introducidos para los nodos SI	106
Fig. 4.9 Red Abierta. Datos introducidos para los nodos Sist. Inglés	107
Fig. 4.10 Red Abierta. Datos introducidos para los tramos SI	108
Fig. 4.11 Red Abierta. Datos introducidos para los tramos Sist. Inglés	109
Fig. 4.12 Red Abierta. Resultados obtenidos de los nodos SI	110
Fig. 4.13 Red Abierta. Resultados obtenidos de los nodos Sist. Inglés	111
Fig. 4.14 Red Abierta. Resultados obtenidos de los tramos SI	112
Fig. 4.15 Red Abierta. Resultados obtenidos de los tramos Sist. Inglés	113
Fig. 4.16 Configuración de una red cerrada	115
Fig. 4.17 Red cerrada. Datos introducidos para los nodos SI	116
Fig. 4.18 Red cerrada. Datos introducidos para los nodos Sist. Inglés	117
Fig. 4.19 Red cerrada. Datos introducidos para los tramos SI	118
Fig. 4.20 Red cerrada. Datos introducidos para los tramos Sist. Inglés	119

Fig. 4.21 Red cerrada. Resultados obtenidos de los nodos SI	120
Fig. 4.22 Red cerrada. Resultados obtenidos de los nodos Sist. Inglés	121
Fig. 4.23 Red cerrada. Resultados obtenidos de los tramos SI	122
Fig. 4.24 Red cerrada. Resultados obtenidos de los tramos Sist. Inglés	123
Fig. 4.25 Configuración de una red real	125
Fig. 4.26 Red real. Datos introducidos para los nodos SI	126
Fig. 4.27 Red real. Datos introducidos para los nodos Sist. Inglés	127
Fig. 4.28 Red real. Datos introducidos para los tramos SI	128
Fig. 4.29 Red real. Datos introducidos para los tramos Sist. Inglés	129
Fig. 4.30 Red real. Resultados obtenidos de los nodos SI	130
Fig. 4.31 Red real. Resultados obtenidos de los nodos Sist. Inglés	131
Fig. 4.32 Red real. Resultados obtenidos de los tramos SI	132
Fig. 4.33 Red real. Resultados obtenidos de los tramos Sist. Inglés	133
Fig. 4.34 Resultados del módulo de diseño de tuberías	136
Fig. 4.35 Resultados del módulo de selección de compresores	138
Tabla. A-1 Correlaciones de Gopal para la carta de Standing y Katz	Anexo A
Fig. A.1 Viscosidad como función de la presión reducida	Anexo A
Fig. A.2 Tipos de compresores seleccionados	Anexo A
Fig. A.3 Pérdidas por accesorios	Anexo A

GLOSARIO

P = Presión kPa en S.I., psi en sistema inglés

\bar{V} = Volumen Específico en m^3/kg o pie^3/lb

R = Constante del gas

R_{univ} = Constante universal de los gases

R_{aire} = Constante del aire

Z = Factor de compresibilidad del gas

ρ = Densidad en kg/m^3 o lb/pie^3

G = Gravedad específica del gas

g = Constante de gravedad

k = Coeficiente isentrópico del gas

C_P = Calor específico a presión constante

C_V = Calor específico a volumen constante

μ = Viscosidad dinámica en $\text{mPa}\cdot\text{s}$ o en cP

ν = Viscosidad cinemática

v = velocidad en m/s o pie/s

τ = Esfuerzo cortante

D = Diámetro en mm o pulg

Re = Número de Reynolds

z = Elevación respecto a una referencia en m o pie

f = Factor de fricción

Q = Caudal en m^3/s o $\text{Pie}^3/\text{día}$

\dot{m} = Flujo másico

W = Trabajo

W_{pol} = Trabajo politrópico

W_{ise} = Trabajo isentrópico

N = Potencia en kW o hp

h = Eficiencia

M = Presiones elevadas al cuadrado

[n] = Ver referencia **n** en la bibliografía

INTRODUCCION

Venezuela es conocido por ser uno de los mayores países exportadores de energía del mundo, siendo la energía química en forma de combustibles fósiles líquidos la que representa el mayor porcentaje de esta exportación, lo cual ha obligado al gobierno nacional a reducir el consumo interno de este producto.

En los últimos años, las políticas de sustitución energética impulsadas por el gobierno nacional, han convertido al gas natural en la primera fuente de energía alternativa del país, lo que ha generado proyectos de gran envergadura a nivel nacional dedicados sólo al transporte de este producto desde los centros de producción hasta el consumidor.

En vista de lo anterior, y buscando las alternativas para satisfacer el incremento de la demanda de este producto a nivel nacional, la industria petrolera desvía parte de sus proyectos a las empresas consultoras, para reducir la carga de ingeniería conceptual, básica y de detalle que sobre la misma recae.

Este trabajo nace de la necesidad de facilitar los cálculos de Ingeniería Mecánica en los proyectos de la Empresa Nouel Ingenieros Consultores C.A., siendo de especial interés, el análisis de flujo compresible en tuberías, ya que en este sentido han sido impulsados un gran número de proyectos que se ofrecen en licitación para este sector.

La realización de un programa de cálculo basado en una aplicación de 32 bits adaptado a los requerimientos actuales de Hardware y Software

comerciales, en el cual se consideren todos los aspectos de interés para el análisis del flujo de gases en tuberías, basado en las normas de la industria petrolera nacional, facilitará a los ingenieros el cálculo de longitud equivalente, caídas de presión y diámetros internos, análisis y diseño de redes de tuberías de gas, y cálculo de potencia y selección de compresores, todo adaptado a los requerimientos de diseño de la industria petrolera nacional (Normas PDVSA Nro. 90616.1.024.1993 y Nro. L-TP 1.5.1994).

Este trabajo ofrece una solución económica frente a otros paquetes comerciales, ofreciendo además soluciones adaptadas a las normas de diseño vigentes en Venezuela.

El Capítulo I contempla todo el basamento teórico requerido para la realización de este trabajo desde el punto de vista de propiedades de los fluidos compresibles, características del flujo, fundamentos de redes de tuberías y selección de compresores.

El capítulo II abarca el modelo matemático utilizado para la realización de este trabajo, indicando el manejo de las ecuaciones, y la manera con que serán implementadas en el programa de análisis de fluidos compresibles.

El capítulo III indica la forma del algoritmo del programa, además de indicar la manera en la que este debe ser utilizado.

El capítulo IV incluye todas las validaciones del programa realizado, indicando los márgenes de error obtenido frente a otros simuladores comerciales y frente a sistemas de tuberías operativos en la actualidad.

El Capitulo V presenta las conclusiones obtenidas a partir de este trabajo y las recomendaciones que se ofrecen para futuras aplicaciones de este trabajo especial.

INDICE

Resumen	I
Indice de figuras	II
Glosario	V
Introducción	VI
CAPITULO I: Fundamentos de Mecánica de fluidos	1
CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO	
Generalidades	2
Densidad	3
Peso Molecular	3
Factor de compresibilidad Z	4
Gravedad específica	8
Propiedades críticas y pseudocríticas	8
Calor específico y constante isentrópica	11
Viscosidad	12
CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO	
Generalidades	16
Número de Reynolds	17
Ecuación general de la energía	18

Ecuación general de la energía para flujo isotérmico	19
Ecuación de Weymouth	26
Ecuación de Panhandle	27
Ecuación de Panhandle Modificada	28
Velocidad de erosión	29
Ecuación de la continuidad	30
FUNDAMENTOS DE REDES DE TUBERÍAS	
Generalidades	32
Términos y definiciones de la teoría gráfica	32
Topología de las redes	35
La matriz de incidencia nodo-tramo	37
La matriz de incidencia tramo-lazo	38
TEORÍA DE COMPRESORES	
Generalidades	39
Compresores dinámicos	40
Compresores de Desplazamiento positivo	41
Cálculo de potencia de los compresores	41
CAPITULO II: Modelo matemático	47
MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE LA LONGITUD EQUIVALENTE	
	48

MODELO MATEMÁTICO PARA LA
ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE
DISEÑO DE UNA TUBERÍA

Variables que intervienen en el cálculo de los parámetros de diseño	49
Presión de descarga conocida	50
Presión de entrada y descarga conocidas	51
Presión y diámetro conocidos	52

MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO
DE REDES DE TUBERÍAS

Variables que intervienen en el cálculo de la red:	
Variables de la red	55
Variables de los tramos	55
Variables de los nodos	56

MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA RED

Generalidades	56
Linealización de la ecuación de la energía	57
Método de Hardy-Cross	59
Método de sustituciones sucesivas de ecuaciones	60
Método de solución simultánea de ecuaciones	62
Métodos numéricos de solución de ecuaciones	64

MODELO MATEMÁTICO DE SELECCIÓN DE COMPRESORES

VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DE COMPRESORES 67

CAPITULO III: Estructura del programa 71

Generalidades 72

Entrada 73

El módulo longitud 74

El módulo de diseño de tuberías 75

El módulo de redes de tuberías 81

Módulo de Selección de Compresores 91

CAPITULO IV: Validación de resultados 94

Generalidades 95

Validación del módulo longitud equivalente 95

Validación del módulo redes de tuberías 104

Validación de una red abierta 105

Validación de una red cerrada 115

Validación de una red real 125

Validación del módulo tuberías 135

Validación del módulo Compresores 137

CAPITULO V: Conclusiones y recomendaciones	139
Conclusiones	140
Recomendaciones	142
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	143
ANEXOS	145

CAPITULO I

**FUNDAMENTOS DE MECÁNICA DE
FLUIDOS**

CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO

GENERALIDADES:

La solución de cualquier problema de flujo de fluidos requiere de un conocimiento previo de las propiedades físicas del fluido que se está analizando. Estas propiedades han sido objeto de estudio durante muchos años, hasta el punto de lograr tablas con valores exactos de las mismas, que son de gran utilidad en los análisis de flujo.

En este capítulo se estudiarán las características generales que presentan los fluidos compresibles. Una de las principales características de este tipo de fluidos, es que su densidad es variable, lo que influye de forma significativa al momento de estudiar su flujo, diferenciándolo notablemente del flujo incompresible.

Se definirán las propiedades termodinámicas y físicas de los fluidos compresibles, entre las cuales destacan la viscosidad, la densidad, el peso molecular y la gravedad específica de los gases.

DENSIDAD:

Se define por densidad ρ , a la masa que ocupa un cuerpo por unidad de volumen^[1]. La unidad del sistema internacional para la densidad es el kg/m^3 . En sistema inglés se utiliza la lbm/pie^3 , Es frecuente utilizar también slug/m^3 .

PESO MOLECULAR:

Para tener clara la definición de peso molecular, se debe recurrir en principio a la definición de peso atómico. Por acuerdo internacional, el peso atómico, también conocido como masa atómica, es la masa de un átomo en unidades de masa atómica (uma). Una unidad de masa atómica se define como una masa exactamente igual a un doceavo de la masa de un átomo de carbono-12. Este átomo tiene seis protones y seis neutrones y es el átomo de referencia para medir el peso atómico de los demás elementos ^[2].

El peso molecular, también conocido como masa molecular, es la suma de los pesos atómicos de los elementos que conforman la molécula de un compuesto. Si varios átomos de un mismo elemento están presentes en una molécula, se multiplica el peso atómico por el número de veces que esta aparezca en dicha molécula.

FACTOR DE COMPRESIBILIDAD Z

Aunque se puede suponer que los gases reales se comportan como un gas ideal, no se puede esperar que lo hagan en todas las condiciones. Por ejemplo, sin la presencia de las fuerzas intermoleculares, los gases no se condensarían para formar líquidos. Para los gases reales:

$$\frac{P \cdot \bar{V}}{R \cdot T} = Z \quad (1.1)$$

Donde P es la presión a la que se encuentra sometido el gas, \bar{V} el volumen específico, T la temperatura, y R es la constante de dicho gas.

El factor de compresibilidad Z es el valor que define el comportamiento real de un gas y solo puede ser considerado igual a la unidad para presiones relativamente bajas ($P \leq 500$ kPa); pues al aumentar la presión las desviaciones del comportamiento ideal se hacen significativas. Debido a que las fuerzas de atracción actúan entre las moléculas a distancias relativamente cortas. A presión atmosférica, las moléculas de un gas están muy separadas y las fuerzas de atracción son despreciables. A presiones elevadas, aumenta la densidad del gas y las moléculas se encuentran ahora más cerca unas de otras. Entonces las fuerzas moleculares se vuelven significativas y afectan el movimiento de las moléculas, por lo que el gas no se comportará en forma ideal ^[2].

La constante R del gas es la razón entre la constante R_{univ} de los gases dividida entre el peso molecular de dicho gas. Dependiendo de las unidades, la constante universal R_{univ} tiene los siguientes valores:

$$R_{univ} = 8,3144 \frac{kPa \cdot m^3}{kgmol \cdot K}$$

$$R_{univ} = 10,732 \frac{psia \cdot ft^3}{lbmol \cdot ^\circ R}$$

$$R_{univ} = 1,987 \frac{Btu}{lbmol \cdot ^\circ R}$$

sabiendo que la densidad es el inverso del volumen específico se tiene:

$$\mathbf{r} = \frac{1}{V} \quad (1.2)$$

y sustituyendo la ec. (1.2) en la ec. (1.1) se tiene:

$$\frac{P}{\mathbf{r} \cdot R \cdot T} = Z \quad (1.3)$$

La ec. (1.3) representa la ecuación de estado para gases reales.

La mayoría de los gases que fluyen por redes de tuberías presentan un comportamiento real debido a las elevadas presiones a las cuales están sometidos en los gasoductos.

Existe una gran variedad de correlaciones para obtener este importante parámetro ^[3]. De acuerdo a la ley de Van der Waals de estados correspondientes, las características de un gas son función de su proximidad relativa a su punto crítico. Esto significa que la desviación del comportamiento ideal de los gases es la misma si estos se encuentran en el mismo estado relativo a su estado crítico. Así, los valores de presión y temperatura que expresan la desviación del comportamiento ideal de un gas real son la presión reducida P_r , y la temperatura reducida T_r :

$$Z = f(P_r, T_r)$$

Donde:

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad (1.4)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (1.5)$$

Para mezclas de gases, las cantidades reducidas se conocen como pseudoreducidas.

Las correlaciones de Standing y Katz (1942) mostradas en la fig.(1.1) permiten obtener Z a partir de P_r y T_r para gases naturales dulces (sin impurezas de H_2S y CO_2).

Gopal^[4] en 1977 presentó unas correlaciones de curvas cuyo objetivo es representar a través de ecuaciones, la Carta de Standing y Katz. Estas ecuaciones son de la forma:

$$Z = P_r(A \cdot T_r + B) + C \cdot T_r + D \quad (1.6)$$

donde A , B , C , y D son las constantes de cada correlación. En total se tienen trece ecuaciones de este tipo, cuyos porcentajes de error en comparación con carta de Standing y Katz se encuentran entre 0,6% y 2,5%^[4]. En la Tabla A-1 del **Anexo A** se muestran las correlaciones de Gopal.

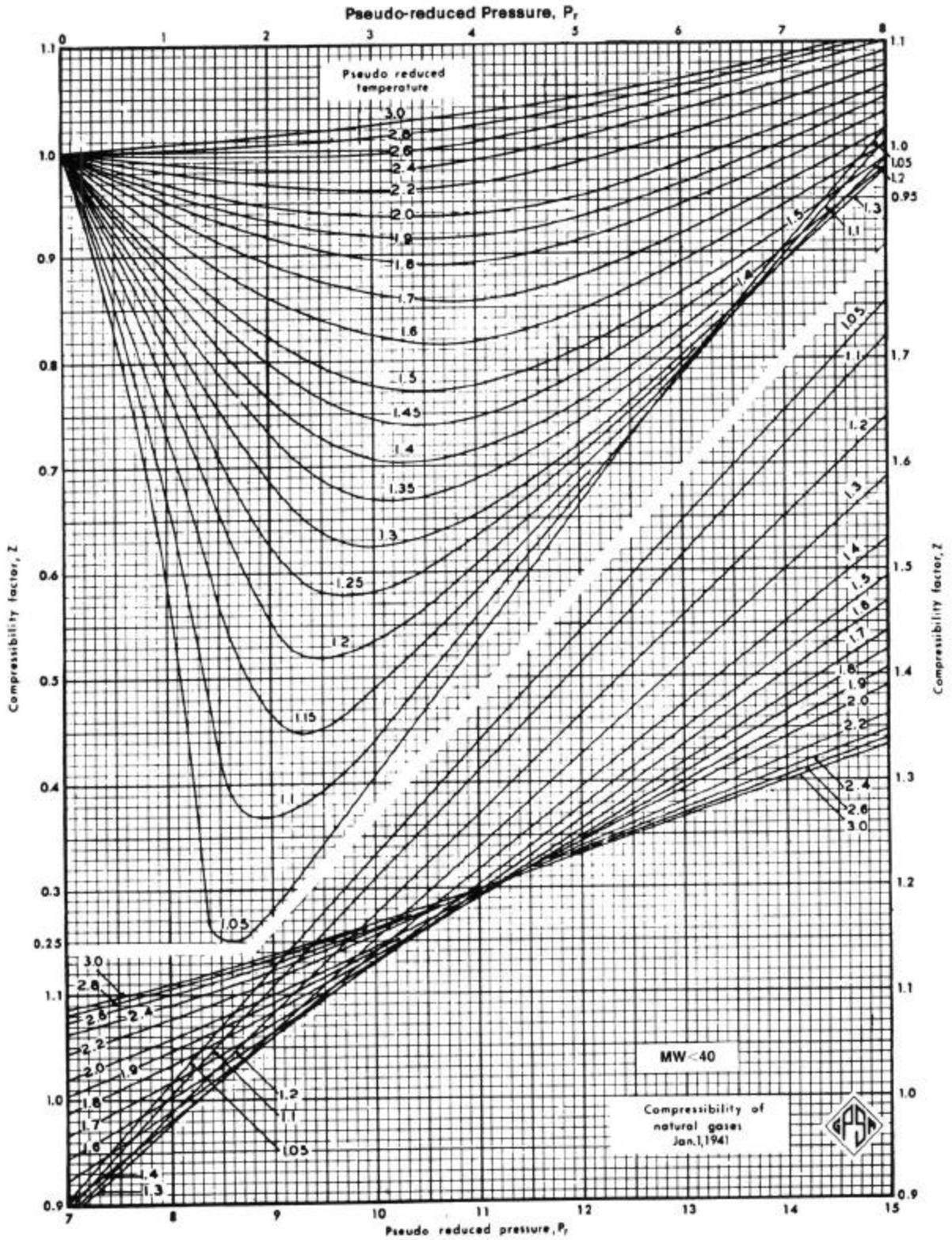


Fig. 1.1 Factor de compresibilidad de los gases naturales. Cortesía de Gas Processors Suppliers Association.

GRAVEDAD ESPECÍFICA:

Se define la gravedad específica G como la razón entre la densidad de una sustancia y la densidad de otra sustancia de referencia, estando ambas a una temperatura especificada.

En forma casi universal se utiliza el agua como sustancia de referencia para sólidos y líquidos, y casi siempre la temperatura especificada es $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para los gases, generalmente se utiliza el aire como sustancia de referencia, estando ambos fluidos a las mismas condiciones de temperatura, presión y humedad relativa.

Debido a que números iguales de moles de gases ocupan volúmenes iguales, puede decirse que la gravedad específica de un gas es también la razón del peso molecular del gas al peso molecular del aire. El peso molecular del aire puede ser tomado como $28,9644$ ^[1].

CONDICIONES CRITICAS Y PSEUDOCRITICAS:

Se define la temperatura crítica de una sustancia pura, como la máxima temperatura a la cual esta sustancia puede existir solo como líquido ^[5]. La presión crítica, es la presión de vapor de una sustancia pura, a la temperatura crítica de la misma. La densidad crítica se define como la densidad de una sustancia a la presión y temperatura crítica. Para gases naturales, con múltiples componentes, se definen las condiciones pseudocríticas, como la

suma de las condiciones críticas de cada componente, multiplicadas por su respectiva fracción molar:

$$P_{pc} = \sum_{i=1}^n y_i P_{ci} \quad (1.7)$$

Thomas et al. ^[3] tomaron datos de la fig. (1.2), para hallar las condiciones pseudocríticas del gas a partir de la gravedad específica G del mismo, obteniendo las siguientes correlaciones:

$$P_{pc} = 709.604 - 58.718 \cdot G \quad (1.8)$$

$$T_{pc} = 170.491 + 307.344 \cdot G \quad (1.9)$$

donde P_{pc} es la presión pseudocrítica en psi y T_{pc} es la temperatura pseudocrítica del gas en $^{\circ}\text{R}$. Las ecuaciones (1.8) y (1.9) pueden ser transformadas a unidades del sistema internacional, quedando:

$$P_{pc} = 4892.5474 - 404.8464 \cdot G \quad (1.10)$$

$$T_{pc} = 94.7172 + 170.7467 \cdot G \quad (1.11)$$

donde P_{pc} es la presión pseudocrítica en kPa y T_{pc} es la temperatura pseudocrítica del gas en K.

Estas ecuaciones son aplicables a gases con menos de 3% de impurezas de H_2S , y 5% de N_2 ^[3].

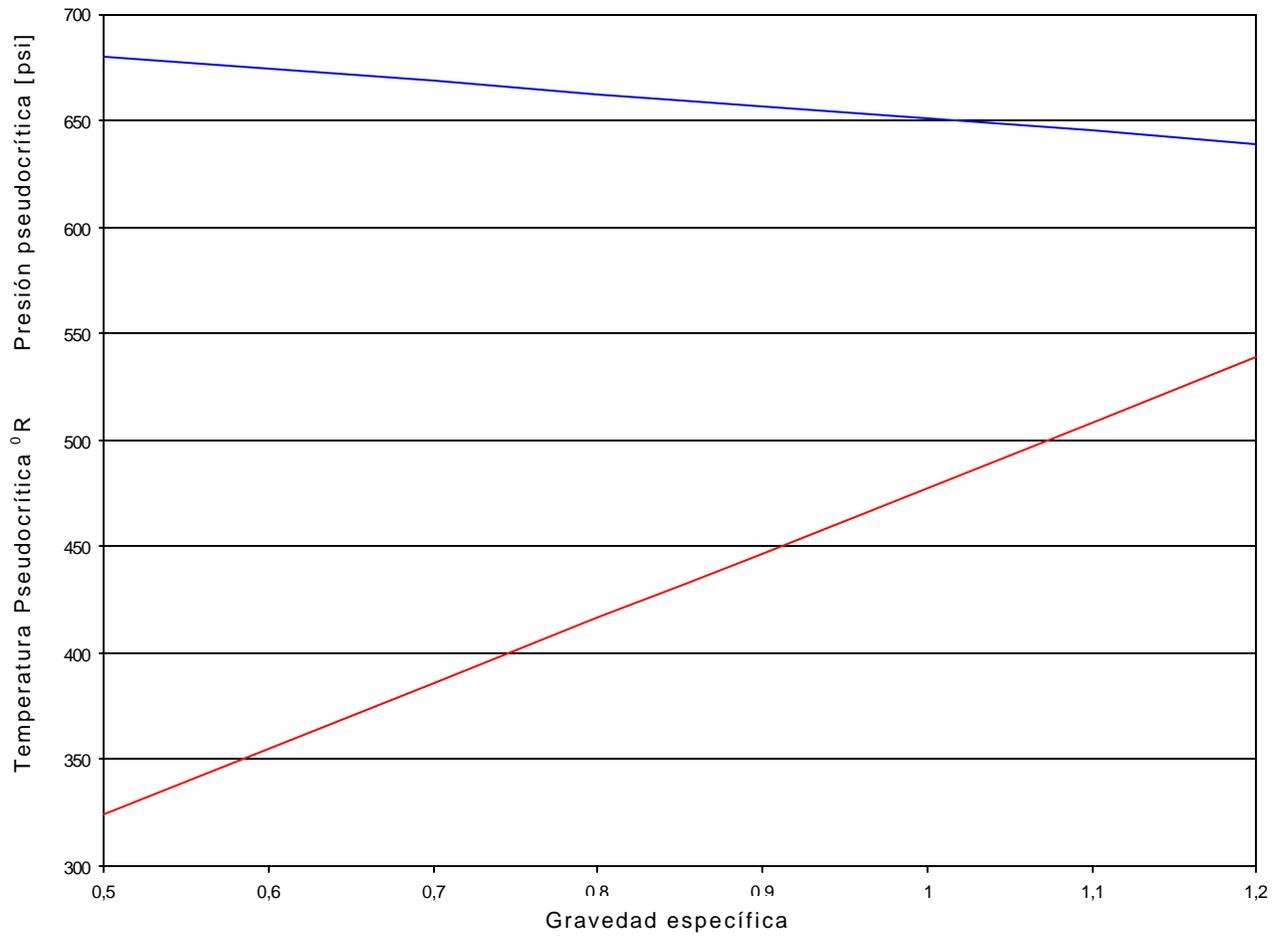


Fig.1.2 Propiedades pseudocríticas de los gases naturales.

CALOR ESPECÍFICO Y CONSTANTE ISENTRÓPICA:

Se define el calor específico, a presión constante, de una sustancia, en unidades del sistema internacional, como la energía, en Joules, necesaria para elevar, en un grado Kelvin, la temperatura de un kilogramo de dicha sustancia, manteniéndose constante la presión durante dicho proceso ^[5].

Se define el calor específico, a volumen constante, de una sustancia, en unidades del sistema internacional, como la energía, en Joules, necesaria para elevar, en un grado Kelvin la temperatura de un kilogramo de dicha sustancia, manteniéndose constante el volumen durante dicho proceso.

Se define la constante isentrópica k , como la razón entre el calor específico a presión constante, de una sustancia, y el calor específico, a volumen constante, de la misma sustancia, a las mismas condiciones de presión y temperatura. El calor específico es una cantidad intensiva.

$$k = \frac{C_P}{C_V} \quad (1.12)$$

conociendo además, que para un gas ideal, $C_P - C_V = R$, la ec. (1.12) puede ser reescrita como:

$$k = \frac{C_P}{C_P - R} \quad (1.13)$$

Hankinson et al. ^[3] obtuvieron una correlación para calcular la capacidad específica a baja presión teniendo como incógnitas la gravedad específica del gas, y la temperatura T en $^{\circ}\text{F}$:

$$C_p^0 = 4,6435 - 0,0079997 \cdot T + 5,8425 \cdot G + 1,1533 \cdot G^2 + 0,020603 \cdot G \cdot T + 9,849 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (1.14)$$

Esta ecuación se aplica para rangos de temperatura entre 0 y 200 $^{\circ}\text{F}$. Thomas et al. ^[3] reportaron rangos de error de la ecuación (1.14) de entre 1,01% y 1,37%

Por ser k considerada constante, esta se puede calcular a partir del calor específico a presión estándar.

VISCOSIDAD:

La aplicación de un esfuerzo cortante a un fluido ocasiona una distorsión continua y permanente conocida como flujo ^[1]. La viscosidad es la resistencia que presenta un fluido al movimiento provocado por una fuerza cortante, o por decirlo de otra forma, es la fricción interna del fluido.

La resistencia al flujo o viscosidad se debe fundamentalmente a dos fenómenos que son: la cohesión de las moléculas y la transferencia molecular entre capas, lo que establece un esfuerzo tangencial o cortante. En los líquidos, predomina la cohesión, y como esta disminuye al aumentar la temperatura, del mismo modo disminuye la viscosidad de dichos líquidos.

En los gases por el contrario, la cohesión entre las moléculas es muy débil, y al aumentar la actividad molecular debido al flujo y al aumento de temperatura, se produce un aumento en la transferencia entre moléculas, lo que tiene como consecuencia un aumento en la viscosidad.

La viscosidad dinámica μ de un fluido se define como la relación del esfuerzo cortante τ a la razón de deformación dv/dy :

$$\mu = \frac{\tau}{\left(\frac{dv}{dy}\right)} \quad (1.15)$$

Las unidades del sistema internacional para la viscosidad dinámica son el $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ o $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

Una de las unidades más utilizadas para la viscosidad dinámica es la del sistema c.g.s., conocida como poise. un poise es equivalente a $0,1 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$. Por conveniencia, se trabaja frecuentemente con el centipoise que es equivalente a $0,01$ poise. La viscosidad dinámica del agua a 20°C es aproximadamente 1 centipoise.

La viscosidad cinemática ν , de un fluido, se define como el cociente entre la viscosidad dinámica μ , del fluido y su densidad ρ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.16)$$

La unidad del sistema internacional para la viscosidad cinemática es el m^2/s , y la del sistema inglés es el pie^2/s . La unidad c.g.s. se conoce como

stoke, que equivale a $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, y por conveniencia se utiliza el centistoke que equivale a 0,01 stoke. La viscosidad cinemática del agua a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ es de 1 centistoke ^[1].

Hasta ahora, para obtener la viscosidad exacta de los gases naturales, a una temperatura y presión determinada, es necesario utilizar aparatos de precisión conocidos como viscosímetros. Los valores arrojados por estos dispositivos han servido para construir tablas de viscosidades para gases en función de la presión, temperatura y gravedad específica del gas, como la tabla de la “Gas Processors Suppliers association” ^[6] disponible en el **anexo A** Fig.A.2. Para los efectos de programación, Lee et al. (1966) ^[7] obtuvieron una ecuación analítica para el cálculo de la viscosidad dinámica de los gases naturales:

$$\mathbf{m} = K \cdot \exp(X\mathbf{r}^Y) \quad (1.17)$$

donde:

$$K = \frac{10^{-4} (9.4 + 0.02M) T^{1.5}}{209 + 19M + T}$$

$$X = 3.5 + \frac{986}{T} + 0.01M$$

$$Y = 2.4 - 0.2X$$

μ es la viscosidad dinámica del gas en cP, ρ es la densidad del gas en g/cm³, T es la temperatura del gas en °R y M es el peso molecular del gas. Este método reproduce valores experimentales con un error máximo de 8.99% [3].

CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO

GENERALIDADES:

La determinación exacta de la pérdida de presión de un fluido compresible que circula por una tubería depende básicamente de la relación existente entre presión y densidad, lo cual no es fácil de determinar para cada problema en particular ^[8]. Los casos extremos considerados normalmente son el flujo adiabático ($P \cdot V^k = \text{cte}$) y el flujo isotérmico ($P \cdot V = \text{cte}$). El flujo adiabático ocurre en tuberías cortas y bien aisladas. Esto se debe a que no se transfiere calor desde o hacia la tubería, a excepción de la pequeña cantidad de calor que se produce por fricción y que se añade al flujo.

El flujo isotérmico o flujo a temperatura constante se considera que ocurre muy a menudo, ya que este caso se acerca un poco más a la realidad de lo que sucede en las tuberías. Esto se debe a que el fluido intercambia calor con el ambiente a través de las paredes de la tubería, por lo cual, al cabo de un tiempo, la temperatura del fluido tiende a mantenerse constante. Uno de los casos más comunes de flujo isotérmico ocurre en las tuberías de gas natural, y es el caso de consideración de este trabajo.

Buena parte de las ecuaciones que se presentan en este capítulo han sido desarrolladas en forma experimental por muchos investigadores, debido a la necesidad de tener un modelo matemático lo más aproximado posible a la realidad y adaptado a los distintos casos que se presentan en la práctica.

NÚMERO DE REYNOLDS:

Existen básicamente dos tipos diferentes de flujo de fluidos en tuberías, laminar y turbulento. En flujo laminar el fluido se mueve sin que haya una mezcla significativa de partículas de fluido vecinas ^[9]. Si se inyecta colorante al fluido, este no se mezclaría con todo el fluido, sino que se mantendría circulando describiendo una línea con el resto del fluido durante un buen periodo de tiempo. En un flujo turbulento el movimiento del fluido es irregular, presentándose variaciones aleatorias en la presión y velocidad instantánea del fluido, con respecto a la dirección y con respecto al tiempo.

Las investigaciones de Osborne Reynolds han demostrado que el régimen de flujo en tuberías, es decir, si es laminar o turbulento, depende del diámetro de la tubería, de la densidad y viscosidad del fluido y de la velocidad del flujo. El valor numérico de una combinación adimensional de estas cuatro variables, conocido como número de Reynolds, puede considerarse como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad.

El número de Reynolds puede escribirse como:

$$\text{Re} = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (1.18)$$

Para estudios técnicos, el régimen de flujo en tuberías se considera como laminar si $Re \leq 2000$ y turbulento si $Re \geq 4000$. Entre estos dos valores está la zona denominada crítica donde el régimen del flujo es impredecible, pudiendo ser laminar, turbulento o de transición, dependiendo de muchas condiciones con posibilidad de variación^[10].

ECUACIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA:

La ecuación de la tasa de flujo en estado estable de gas en una tubería es descrita por gran cantidad de fórmulas, pero ninguna es universal^[11]. Los efectos de la fricción son difíciles de cuantificar y son la razón principal de tanta variación en las ecuaciones de flujo.

El teorema de Bernoulli es la expresión de la ley de la conservación de la energía al flujo de fluidos en una tubería^[10]. La ecuación de la Energía entre dos puntos de una tubería, considerando las pérdidas friccionales para el flujo en tuberías puede escribirse como:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_f \quad (1.19)$$

El término h_f representa la transformación de energía mecánica en energía térmica, la cual generalmente no puede ser recuperada y por lo tanto se refiere a una pérdida de energía útil. La mayoría de las fórmulas prácticas

para el flujo de fluidos en tuberías se derivan del teorema de Bernoulli, realizando las consideraciones necesarias para cada caso.

ECUACIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA PARA FLUJO ISOTÉRMICO:

Como se mencionó anteriormente, el flujo de gases a través de gasoductos puede considerarse isotérmico. La ecuación de la energía para flujo isotérmico, cumple con los siguientes parámetros:

- 1.- Flujo isotérmico: la temperatura del flujo no varía significativamente a lo largo de la línea.
- 2.- No se realiza trabajo mecánico por o sobre el sistema, entre los puntos inicial y final de medición.
- 3.- El factor de fricción es constante a lo largo de la tubería.
- 4.- Se considera un flujo estable, estado estable, por lo cual no existen variaciones de flujo en función del tiempo, las cuales generan fenómenos de condensación del gas o pulsaciones en presión o caudal.

Para un flujo estable, la tasa de flujo de masa es constante, y si el área de la sección transversal de la tubería es constante, podemos establecer la ecuación de conservación de la masa entre dos puntos como:

$$\mathbf{r}_1 \cdot v_1 = \mathbf{r}_2 \cdot v_2 \quad (1.20)$$

La fricción dentro de la tubería, ocasiona una pérdida de presión a lo largo de la misma, lo que a su vez a partir de la ecuación de estado (1.3) se traduce en una disminución de la densidad del fluido. En consecuencia, de la ecuación 1.20 se tiene que la velocidad del flujo aumenta, y por lo tanto, la energía cinética del fluido aumenta. Se puede concluir entonces que la disminución de la energía de presión se ve reflejada en el aumento de la energía cinética del fluido

Debido a la variación de la velocidad a través de la tubería, es necesario considerar un pequeño elemento de la longitud total, para calcular la resistencia debida a la fricción, y luego integrar para toda la longitud de la línea, con lo cual se obtiene la perdida total de energía debida a la fricción^[12].

En la fig. (1.3) se tiene la presión P a la distancia x desde la entrada y $P+dP$ a la distancia $x+dx$. La densidad \mathbf{r} y la velocidad v del gas varían análogamente a través del elemento dx de la longitud total L . Si la variación en la densidad $d\mathbf{r}$ a través del elemento diferencial es considerada despreciable (se considera constante la densidad en el elemento), la ecuación de Bernoulli a través del elemento diferencial se expresa como:

$$\frac{P}{\mathbf{r}g} + \frac{v^2}{2g} + z = \frac{P+dP}{\mathbf{r}g} + \frac{(v+dv)^2}{2g} + (z+dz) + dh_f \quad (1.21)$$

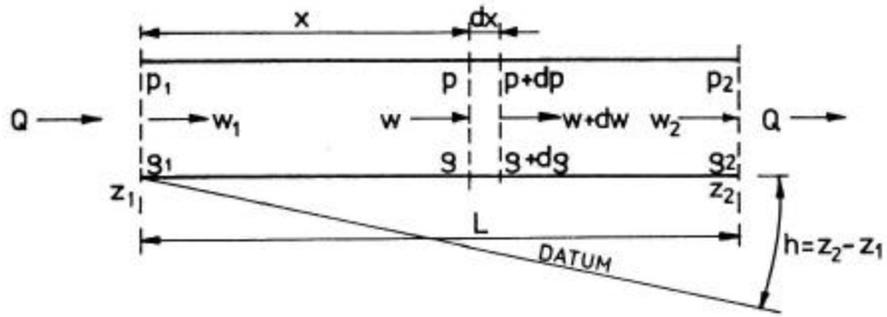


Fig. 1.3. Elemento diferencial de tubería

El cambio en la energía cinética debido a cambios en la densidad y la velocidad es considerado despreciable. La pérdida de energía debida a la fricción a través del elemento diferencial viene dado por la ecuación de Darcy-Weysbach:

$$dh_f = \frac{4fv^2}{D2g} dx \quad (1.22)$$

Con la ecuación (1.22) y las suposiciones anteriores, la ecuación (1.21) queda:

$$-\frac{dP}{rg} = \frac{4fv^2}{D2g} dx + dz \quad (1.23)$$

Multiplicando esta ecuación por rg se tiene:

$$-dP = \frac{2frv^2}{D} dx + rgdz \quad (1.24)$$

De la ecuación de continuidad (1.20) se tiene:

$$\mathbf{r}v = \mathbf{r}_1 v_1 \quad \Rightarrow \quad v = \frac{\mathbf{r}_1}{\mathbf{r}} v_1 \quad (1.25)$$

La pérdida de energía debida a la fricción es convertida en energía térmica que se transfiere a través de las paredes de la tubería al ambiente. La temperatura de flujo T_f del gas tiende a mantenerse constante, y por tal motivo, el flujo es considerado isotérmico^[12].

De la relación termodinámica ^[5]:

$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}_1} \right)^n \quad (1.26)$$

como el flujo es isotérmico $n=1$ y despejando la densidad, la ecuación (1.26) queda:

$$\mathbf{r} = \frac{P}{P_1} \mathbf{r}_1 \quad (1.27)$$

De la ecuación (1.27) en la ecuación (1.25) queda:

$$v = \frac{P_1}{P} v_1 \quad (1.28)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1.27) y (1.28) en la ecuación (1.24) se tiene:

$$-dP = \frac{2f}{D} \frac{P}{P_1} \mathbf{r}_1 \left(\frac{P_1}{P} \right)^2 v_1^2 dx + \frac{P}{P_1} \mathbf{r}_1 g dz \quad (1.29)$$

Multiplicando la ecuación (1.29) por P entonces:

$$-PdP = \frac{2f}{D} r_1 P_1 v_1^2 dx + \frac{P^2}{P_1} r_1 g dz \quad (1.30)$$

De la ecuación de estado (1.3) se tiene:

$$P_1 = r_1 ZRT \quad (1.31)$$

y sustituyendo esta ecuación en la ecuación (1.30) resulta:

$$-PdP = \frac{2f}{D} r_1^2 v_1^2 ZRT dx + \frac{P^2}{ZRT} g dz \quad (1.32)$$

En el termino asociado al cambio de elevación de la tubería, el valor de P puede ser considerado como una presión promedio entre la entrada y la salida de la tubería. De la ecuación (1.20) se tiene:

$$r_1^2 v_1^2 = r_0^2 v_0^2 = r_0^2 \frac{Q_0^2}{A^2} = \frac{r_0^2 Q_0^2}{(\rho \cdot D^2/4)^2} \quad (1.33)$$

donde Q_0 es el caudal a condiciones standard y A es el área transversal de la tubería.

Las condiciones representan el estado termodinámico de una sustancia a la presión $P_0=101.325$ kPa y temperatura $T_0=288$ K. Sustituyendo la ecuación (1.33) en la ecuación (1.31), se obtiene:

$$-PdP = \frac{32}{\rho^2} \frac{f r_0^2 Q_0^2}{D^5} ZRT dx + \frac{P_{prom}^2}{ZRT} g dz \quad (1.34)$$

Otras condiciones termodinámicas típicas son las condiciones normales, que representan el estado termodinámico de una sustancia a la temperatura $T_n=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y presión $P_n=101,325\text{ kPa}$, y las condiciones actuales que representan el estado termodinámico de una sustancia a las condiciones de temperatura y presión reales de operación.

La constante R del gas puede ser relacionada a la constante R_{aire} . Considerando la ecuación de estado (1.3) para el gas y para el aire a las mismas condiciones de presión P_0 y temperatura T_0 estándar, pudiendo considerar el factor de compresibilidad $Z=1$ para estas condiciones:

$$\begin{aligned} P_0 &= \mathbf{r}_0 R T_0 \\ P_0 &= (\mathbf{r}_{\text{aire}})_0 R_{\text{aire}} T_0 \end{aligned} \quad (1.35)$$

igualando las presiones, se tiene:

$$\mathbf{r}_0 R T_0 = (\mathbf{r}_{\text{aire}})_0 R_{\text{aire}} T_0 \quad (1.36)$$

$$\frac{\mathbf{r}_0}{(\mathbf{r}_{\text{aire}})_0} = \frac{R_{\text{aire}}}{R} = G \quad (1.37)$$

donde G es la gravedad específica del gas. Finalmente, despejando R del gas de la ecuación (1.37) se tiene:

$$R = \frac{R_{\text{aire}}}{G} \quad (1.38)$$

entonces, la ecuación de estado puede ser escrita como:

$$\mathbf{r}_0 = \frac{GP_0}{R_{aire}T_0} \quad (1.39)$$

sustituyendo las ecuaciones (1.38) y (1.39) en la ecuación (1.34) se tiene:

$$\begin{aligned} -PdP &= \frac{32}{\mathbf{p}^2} \left(\frac{GP_0}{R_{aire}T_0} \right)^2 \frac{Q_0^2}{D^5} \frac{ZR_{aire}}{G} T dx + \frac{P_{prom}^2 G}{ZR_{aire}T} g dz \\ -PdP &= \frac{32}{\mathbf{p}^2} \frac{fGZT}{R_{aire}D^5} Q_0^2 \left(\frac{P_0}{T_0} \right)^2 dx + \frac{P_{prom}^2 G}{ZR_{aire}T} g dz \end{aligned} \quad (1.40)$$

Integrando la ecuación (1.40) de $x=0$, $P=P_1$, $z=z_1$ a $x=L$, $P=P_2$, $z=z_2$ queda:

$$\begin{aligned} -\left(\frac{P_2^2 - P_1^2}{2} \right) &= \frac{32}{\mathbf{p}^2} \frac{fLZTG}{D^5} \left(\frac{P_0}{T_0} \right)^2 Q_0^2 + \frac{P_{prom}^2 G}{ZR_{aire}T} g(z_2 - z_1) \\ P_1^2 - P_2^2 &= \frac{64}{\mathbf{p}^2} \frac{fLZTG}{D^5} \left(\frac{P_0}{T_0} \right)^2 Q_0^2 + \frac{2P_{prom}^2 G}{ZR_{aire}T} g(z_2 - z_1) \end{aligned} \quad (1.41)$$

despejando el caudal estándar de la ecuación (1.41):

$$Q_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{p}^2 R_{aire}}{64}} \cdot \frac{T_0}{P_0} \sqrt{\frac{D^5 \left[(P_1^2 - P_2^2) - \frac{2P_{prom}^2 G (z_2 - z_1) g}{ZR_{aire}T} \right]}{fGLTZ}}$$

$$Q_0 = \sqrt{\frac{P^2 R_{aire}}{64} \cdot \frac{T_0}{P_0}} \cdot D^{2.5} \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2) - \frac{2P_{prom}^2 G(z_2 - z_1)g}{ZR_{aire}T}}{fGLTZ}} \quad (1.42)$$

La ecuación (1.42) es la expresión general de la ecuación de la energía para flujo isotérmico en estado estable.

ECUACIÓN DE WEYMOUTH:

La ecuación de Weymouth es una de las ecuaciones más antiguas para describir el flujo isotérmico de gas, sin embargo es muy utilizada para sistemas de distribución pequeños en los cuales las presiones no son muy elevadas, como los sistemas de distribución residencial, donde se tienen presiones inferiores a los 500 kPa ^[13]. El factor de fricción de Weymouth puede escribirse como:

$$f = C_f \cdot D^{1/6} \quad (1.43)$$

donde C_f es una constante, igual a 6,521 si el diámetro D de la tubería está dado en mm o igual a 11,18 si el diámetro está dado en pulg.

Cuando la ecuación (1.43) se sustituye en la ecuación (1.42) se tiene la ecuación de Weymouth:

$$Q = C_Q \cdot \left(\frac{T_0}{P_0}\right) \cdot D^{8/3} \cdot \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{G \cdot T_f \cdot L}} \quad (1.44)$$

Donde C_Q es una constante, igual a 0,0037477 cuando se utilizan unidades del sistema internacional o igual a 433,49 para unidades del sistema inglés ^[13].

Esta ecuación pierde exactitud en el cálculo del caudal en tuberías de longitud superior a 1km y presión por encima de los 500 kPa, pero es fácil de usar y usualmente se tienen resultados conservadores.

ECUACIÓN DE PANHANDLE:

La Eastern Panhandle Co. en base a su amplia experimentación, realizó varias modificaciones a la ecuación general de la energía, entre estas el factor de fricción experimental de Panhandle ^[13]:

$$f = E \cdot C_f \cdot \left(\frac{Q \cdot G}{D} \right)^{0,07305} \quad (1.45)$$

Donde:

C_f es una constante, igual a 11,85 para las unidades del sistema internacional y 7,2111 para las unidades del sistema inglés.

E = Factor de eficiencia de la tubería (0,9 para tuberías nuevas de acero al carbono).

Sustituyendo la ecuación (1.45) en la ecuación (1.42) y en base a otras consideraciones experimentales se tiene la ecuación de flujo de Panhandle ^[13]:

$$Q = E \cdot C_Q \cdot \left(\frac{T_b}{P_b} \right)^{1,07881} \cdot D^{2,6182} \cdot \left(\frac{P_1^2 - e^s P_2^2}{G^{0,8539} \cdot T_f \cdot L} \right)^{0,5394} \quad (1.46)$$

$$s = \frac{C_s \cdot \Delta z \cdot G}{T_f \cdot Z} \quad (1.47)$$

La Eastern Panhandle Co. introduce el factor de densidad del gas s en sustitución del factor que incluye a la presión promedio de la ecuación (1.42). Este factor disminuye la desviación del fenómeno real presente en la ecuación de Weymouth (1.46). El factor de densidad del gas es introducido a partir de la experimentación.

C_Q es una constante igual a 0,0045965 para unidades del sistema internacional o igual 435.87 para unidades del sistema inglés. La ecuación 1.46 tiene buenos resultados para un rango del número de Reynolds entre 5×10^6 hasta 11×10^6 .

Δz = diferencia de cota entre la entrada y la salida de la tubería.

C_s es una constante, igual a 0,0684 para unidades del sistema internacional o igual a 0,0375 para unidades del sistema inglés.

ECUACIÓN DE PANHANDLE MODIFICADA:

Esta ecuación es la más usada para el diseño de tuberías largas de alta presión¹³. A diferencia de la ecuación de Panhandle original, esta ecuación toma en cuenta el factor de compresibilidad del gas y tiene un rango de aplicación de número de Reynolds mucho mayor que su antecesora ($Re = 1 \times 10^6$ hasta $Re = 40 \times 10^6$)¹³. El factor de fricción de Panhandle modificado es:

$$f = E \cdot C_f \cdot \left(\frac{Q \cdot G}{D} \right)^{0,01961} \quad (1.48)$$

Donde C_f es una constante, igual a 19,08 para unidades del sistema internacional o 16,7 para unidades del sistema inglés.

Sustituyendo la ecuación (1.48) en la ecuación (1.42) y en base a otras consideraciones experimentales la ecuación de Panhandle modificada es:

$$Q = E \cdot C_Q \cdot \left(\frac{T_b}{P_b} \right)^{1,020} \cdot D^{2,530} \cdot \left(\frac{P_1^2 - e^s \cdot P_2^2}{L_e \cdot T_f \cdot z \cdot G^{0,961}} \right)^{0,510} \quad (1.49)$$

La ecuación de Panhandle modificada será la expresión utilizada en este trabajo para los cálculos de diseño, debido a su amplio rango de aplicación y su mayor aproximación al fenómeno real.

VELOCIDAD DE EROSIÓN:

Se define por velocidad de erosión, aquella velocidad que, al ser alcanzada por el fluido, produce un desgaste por fricción considerable en la pared interna de la tubería, lo que a larga genera una disminución en el espesor de pared de la misma. La industria petrolera nacional¹⁴, establece velocidades límite de erosión, en función de la densidad del fluido que atraviesa la línea. Estas velocidades son:

$$v = \frac{160}{\sqrt{r}} \quad \text{Velocidad límite de erosión.}$$

$$v = \frac{125}{\sqrt{r}} \quad \text{Velocidad de servicio intermitente}$$

$$v = \frac{100}{\sqrt{r}} \quad \text{Velocidad de servicio continuo. Máxima recomendada de diseño}$$

Todas las velocidades mencionadas anteriormente, vienen expresadas en Pie/s, y las densidades utilizadas para su cálculo vienen expresadas en lb/pie³.

Cuando el flujo es incompresible, se puede decir que la densidad es invariable, y que por lo tanto, la velocidad a lo largo de toda la línea permanece constante. Cuando el flujo es compresible, a medida que disminuye la presión a lo largo de la línea, disminuye también la densidad, lo que produce que la velocidad aumente a medida que el flujo avanza por la línea. Por lo tanto la velocidad máxima de la línea se tendrá a la descarga de la misma, y es esta la velocidad de referencia para ser comparada con la velocidad límite de erosión. Para los efectos de este trabajo, se considerará la velocidad de servicio continuo, que es la máxima recomendada para el diseño de líneas.

ECUACIÓN DE LA CONTINUIDAD:

Puesto que la masa que fluye a través de un sistema se conserva, entonces, la suma de todos los flujos másicos que llegan a un punto es igual a la suma de todos los flujos másicos que salen de dicho punto⁸:

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_{ie} = \sum_{j=1}^m \dot{m}_{js} \quad (1.50)$$

Como en este estudio, se consideran principalmente los caudales, la ecuación de la continuidad puede escribirse como:

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i \cdot Q_{ie} = \sum_{j=1}^m \mathbf{r}_j \cdot Q_{js} \quad (1.51)$$

Adicionalmente, considerando los caudales a las condiciones estándar:

$$\sum_{i=1}^n Q_{ei} = \sum_{j=1}^m Q_{sj} \quad (1.52)$$

FUNDAMENTOS DE REDES DE TUBERÍAS

GENERALIDADES:

La solución a problemas que envuelven redes de tuberías de cualquier característica geométrica, requiere una representación de la red que facilite los cálculos de la misma, de forma tal de obtener el mejor resultado por la vía más sencilla. Estos requerimientos se hallan mediante la teoría gráfica, la cual permite la representación de la estructura de la red, a través de las propiedades de los componentes de la misma, lo que trae como consecuencia una representación explícita de los componentes de dicha red.

TÉRMINOS Y DEFINICIONES DE LA TEORÍA GRÁFICA:

Este método desarrollado por Harary en 1969, Christofides en 1975, Deo en 1976 y finalmente por A.J. Osiadacz ^[12] en 1987, consta de una gráfica $G_n=(N, M)$ y consiste en un grupo de objetos $N = \{n_1, n_2, \dots\}$ conocidos como nodos y otro grupo $M=\{m_1, m_2, \dots\}$ conocidos como tramos. Estos tramos a su vez son identificados por un par no ordenado (n_i, n_j) de nodos. Los nodos son representados mediante puntos y los tramos mediante segmentos de línea que conectan a dichos puntos. La figura 1.4 muestra una red compuesta de cuatro nodos numerados del 1 al 4, y tres tramos:

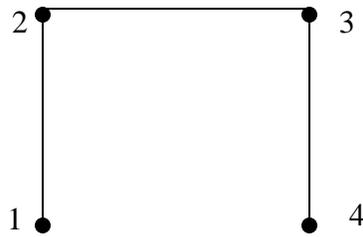


Fig. 1.4 Elemento de red

Esta red puede ser representada como $G_n=(N, M)$ donde:

$$N=\{1, 2, 3, 4\}$$

$$M=\{(1,2), (2,3), (3,4)\}$$

Esta descripción representa las propiedades más importantes de una red. Adicionalmente, el grupo de nodos y tramos respectivamente, no tienen un orden específico, como tampoco tienen que estar ordenados los pares de nodos que identifican a un tramo en particular. En vista de esto, la red anterior, puede ser representada como:

$$N=\{2, 3, 1, 4\}$$

$$M=\{(3,2), (2,1), (4,3)\}$$

Se presentan dos casos particulares en la representación gráfica de una red; el primero, cuando un nodo se encuentra conectado a sí mismo, lo cual correspondería a un tramo de la forma (n_j, n_j) , el cual se conoce con el nombre de lazo propio. El segundo caso se presenta cuando dos nodos se encuentran conectados por más de un lazo; esto correspondería a un grupo A de la forma:

$$M=\{(n_i, n_j), (n_i, n_j), (n_i, n_j)\}$$

Estos tramos se conocen con el nombre de tramos en paralelo.

Para la simulación de redes de tuberías de gas, se asume que los nodos representan las conexiones de tuberías, y los tramos representan las tuberías

en sí, con una longitud definida asignada a cada una. Esto significa que una gráfica de una red de tuberías de gas tiene su representación G_d , en la cual cada tramo de tubería está representado por un par ordenado de nodos (n_i, n_j) .

Si un nodo n_i es un nodo del tramo m_j , n_i y m_j son adyacentes el uno al otro. El número de tramos adyacentes a un nodo n_i , incluidos los lazos propios que son contados como lazos dobles, se conoce como grado del nodo n_i y se denota mediante $d(n_i)$. Una gráfica en la cual el número de nodos es igual al número de tramos se conoce como gráfica regular ^[12].

Un camino en una gráfica está definido como cualquier secuencia finita de nodos y lazos alternados los cuales comienzan y terminan en un nodo. Un camino que no sea cerrado (comienza y termina en nodos diferentes) es llamado, camino abierto. Un camino elemental, es un camino en el cual no se utiliza el mismo nodo más de una vez. En los caminos elementales, la suma de la longitud de los tramos equivale a la longitud del camino elemental. Un camino cerrado, el cual no usa el mismo nodo más de una vez (a excepción del nodo de partida que es el mismo de llegada), se conoce con el nombre de lazo. En la figura Nro. (1.5) se observan los distintos tipos de camino:

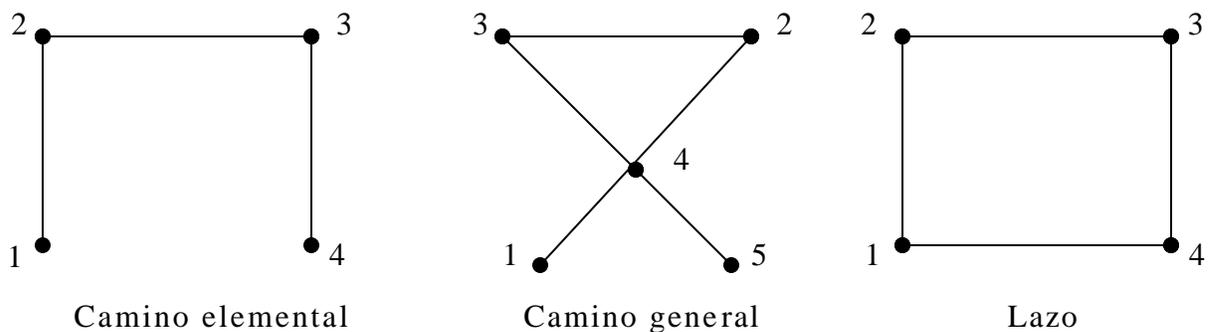


Fig. 1.5 Tipos de camino.

TOPOLOGÍA DE LAS REDES:

Una matriz es la forma más sencilla y útil de representar una gráfica de una red de tuberías, ya que las matrices son fácilmente manejables desde el punto de vista mecánico. En análisis de redes de tuberías, las matrices se convierten en la forma natural de expresar el problema. Cualquier red de tuberías de gas puede ser descrita por un grupo de matrices basadas en la forma de la red. Considerando el caso de la red de tuberías de gas representada en la figura 1.6:

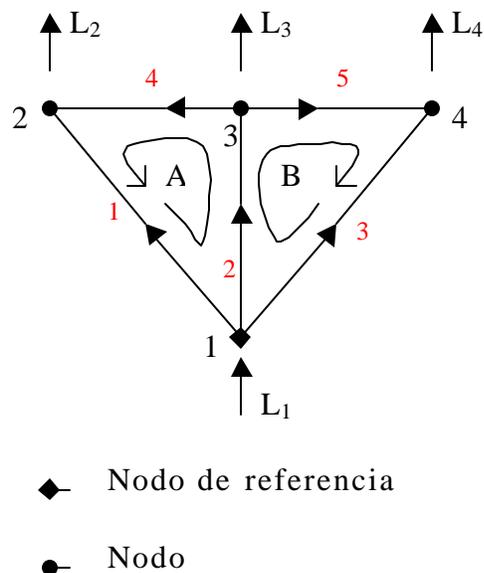


Fig.1.6 Gráfica de una red de tuberías de gas.

Esta red consiste de un nodo de referencia (nodo 1), tres nodos de carga (2,3,4) y cinco tramos de tubería (1, 2, 3, 4, 5). Para el análisis de redes de tuberías, se requiere de al menos un nodo de referencia. Según el modelo matemático de la red, el nodo de referencia es un nodo independiente, y todas

las cantidades tanto nodales como ramales, dependen de él. El nodo que debe ser considerado como nodo de referencia, debe ser aquel en el cual la presión es conocida. De hecho, todos aquellos nodos cuya presión sea conocida, deben ser considerados como nodos de referencia. Los nodos de carga, son aquellos en los cuales cargas L son colocadas en la red. Estas cargas pueden ser positivas, negativas o cero. Una carga negativa, representa una demanda de gas desde la red. Una carga positiva representa un suministro hacia la red, y una carga cero indica que no hay ni suministro ni descarga de la red, a través de un nodo determinado, pero dicho nodo representa un cambio en la topología de la red, como por ejemplo una conexión entre varios tramos. Para condiciones de estado estable, flujo estable, las cargas totales de la red, tanto entrantes como salientes, deben estar balanceadas en los nodos.

La interconexión de una red puede producir un camino cerrado de tramos conocido como lazo. En la fig.(1.6) el **lazo A** consiste de los tramos 4-1-2 y el **lazo B** consiste de los tramos 5-3-2. Un tercer lazo consistiría de los tramos 1-4-5-3, pero sería redundante, ya que los lazos **A** y **B** están ya definidos, y este último está vinculado a **A** y **B** mediante la eliminación del tramo común 2.

Para definir completamente la topología de la red, es necesario asignar un sentido a cada tramo. Cada sentido es asignado arbitrariamente y se asume positivo si es igual al sentido del flujo en el tramo. Si el flujo calculado es negativo, el sentido del tramo es opuesto al del flujo. Se aplica el mismo razonamiento a los lazos, por lo cual se asigna un sentido a cada lazo.

LA MATRIZ DE INCIDENCIA NODO-TRAMO:

La interconexión de una red puede ser descrita por la matriz de incidencia nodo-tramo $A=[a_{ij}]_{m \times n}$ [12]. Esta matriz es rectangular, con el número de filas n igual al número de nodos (incluyendo los nodos de referencia), y el número de columnas m igual al número de tramos en la red. El elemento a_{ij} en la fila i y columna j de la matriz A corresponde al nodo i y a la columna j , y es definido como:

$$a_{ij} = \begin{cases} +1, & \text{si el tramo } j \text{ entra al nodo } i \\ -1, & \text{si el tramo } j \text{ sale del nodo } i \\ 0, & \text{si el tramo } j \text{ no está conectado al nodo } i \end{cases}$$

Para la red mostrada en la fig.(1.6) la matriz de incidencia nodo-tramo es:

	1	2	3	4	5
1	-1	-1	-1		
2	1			1	
3		1		-1	-1
4			1		1

Se observa que el orden de la matriz es $n=4$ nodos, $m=5$ tramos. Las casillas en blanco indican un valor igual a cero.

LA MATRIZ DE INCIDENCIA TRAMO-LAZO:

Los lazos de una red pueden ser descritos por la matriz de incidencia tramo-lazo $\mathbf{B}=[b_{ij}]_{k \times m}$ [12]. Esta matriz es rectangular, con el número de filas igual al número de lazos independientes, y el número de columnas m igual a el número de tramos de la red. El elemento b_{ij} en la fila i y la columna j de la matriz \mathbf{B} corresponde al lazo i y al tramo j , y se define como:

$$b_{ij} = \begin{cases} +1, & \text{si el tramo } j \text{ tiene el mismo sentido del lazo } i \\ -1, & \text{si el tramo } j \text{ tiene sentido contrario al lazo } i \\ 0, & \text{si el tramo } j \text{ no se encuentra en el lazo } i \end{cases}$$

Para la red mostrada en la fig.(1.6) la matriz de incidencia tramo-lazo es:

$\mathbf{B} =$	A	1	2	3	4	5
	B	-1	1		1	
			1	-1		1

Se observa que el orden de la matriz es $k=2$ lazos, $m=5$ tramos. Las casillas en blanco indican un valor igual a cero.

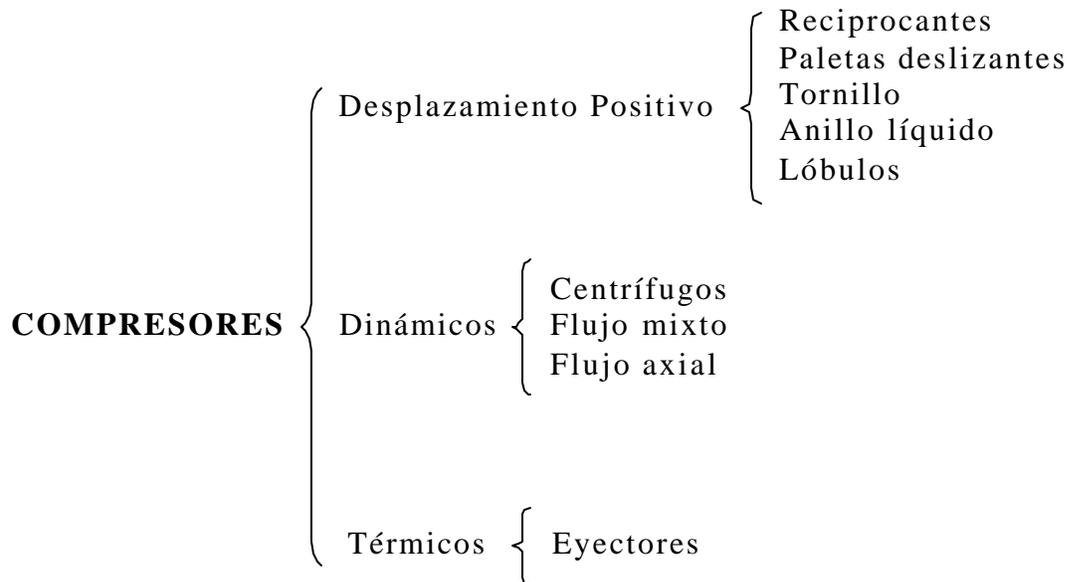
Para los efectos de este trabajo especial, se considerará la representación **Nodo-Tramo** por la facilidad que presenta al momento de introducir los datos.

TEORIA DE COMPRESORES

GENERALIDADES:

Durante el transporte de gas a través de sistemas de tuberías, el fluido pierde parte de su energía inicial debido a la resistencia friccional de las tuberías, lo que resulta en una pérdida de presión ^[12]. Desde el punto de vista de procesos, se debe seleccionar el(los) equipo(s) que permita(n) elevar la presión en la entrada de la tubería, de forma tal que se obtenga el valor de presión deseado a la descarga.

Los compresores se clasifican básicamente en tres tipos:



En el transporte de gas, los compresores de desplazamiento positivo y los dinámicos, son los más usados.

Dependiendo de las características del flujo, y de la elevación de presión requerida, en las estaciones compresoras, los distintos tipos de compresores pueden ser instalados en serie o en paralelo.

COMPRESORES DINAMICOS:

En los compresores dinámicos, el trabajo es realizado sobre el gas por un rotor. El gas es descargado a alta velocidad en un difusor, que convierte la energía cinética del gas en energía de presión.

Las características más importantes de un compresor dinámico son:

- Pocas partes móviles (básicamente el rotor), por lo cual las pérdidas mecánicas son bajas, y los costos de mantenimiento son relativamente bajos.
- Alta capacidad, por lo cual, con este tipo de compresor se pueden alcanzar caudales elevados.
- Descarga continua de gas sin pulsaciones.
- Las relaciones de compresión no son tan altas como en los compresores recíprocos, debido a la ausencia de desplazamiento positivo.

Debido a que los compresores dinámicos son máquinas que ofrecen una relación de compresión baja ($r < 2$), estos se instalan generalmente en arreglos multietapa o en serie dentro de cada estación¹².

COMPRESORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO:

Los compresores de desplazamiento positivo ofrecen menor eficiencia mecánica que los compresores dinámicos debido a la mayor cantidad de partes móviles que presentan los primeros. Las restricciones en el tamaño de los componentes, y la baja eficiencia que presentan con bajas relaciones de compresión, obligan a estas máquinas a funcionar en regímenes de baja capacidad y alta presión, por lo cual son máquinas ideales para ser instaladas en paralelo ^[12].

CALCULO DE POTENCIA DE LOS COMPRESORES:

Al momento de realizar los cálculos relacionados con compresores, se busca principalmente:

- Determinar la potencia aproximada requerida para comprimir un cierto volumen de gas desde unas condiciones de entrada hasta una determinada presión de salida.
- Seleccionar un tipo de compresor existente dependiendo de las condiciones de capacidad y presiones de entrada y descarga.

Existen dos formas en las cuales se puede calcular el trabajo realizado sobre el gas en el proceso de compresión:

- Suponer una compresión sin transferencia de calor a los alrededores, o isentrópica. En este caso el exponente politrópico, es el ratio de los calores específicos de presión y volumen ($n=k$).
- Suponer una compresión a temperatura constante, o isotérmica. En este caso el exponente politrópico es la unidad ($n=1$). Este es el caso que menos trabajo de compresión requiere, pero es el más difícil de lograr en condiciones reales, ya que lograr un enfriamiento del gas durante el proceso de compresión es económicamente poco viable.

El funcionamiento real de los compresores se aproxima mejor al comportamiento isentrópico por lo cual el cálculo de la potencia isentrópica, es el que mejor se aproxima a la potencia real de funcionamiento.

El trabajo politrópico de un compresor se define por la integral:

$$W_{pol} = \int_{P_1}^{P_2} V dP \quad (1.53)$$

donde: W_{pol} = Trabajo politrópico del compresor [J]

V = Volumen [m^3]

P = Presión [Pa]

El ciclo de compresión pasa por cuatro procesos fundamentales, a través de cuatro puntos que representan los cuatro estados termodinámicos a los que se ve sometido el gas, como se puede ver en la fig. 1.7:

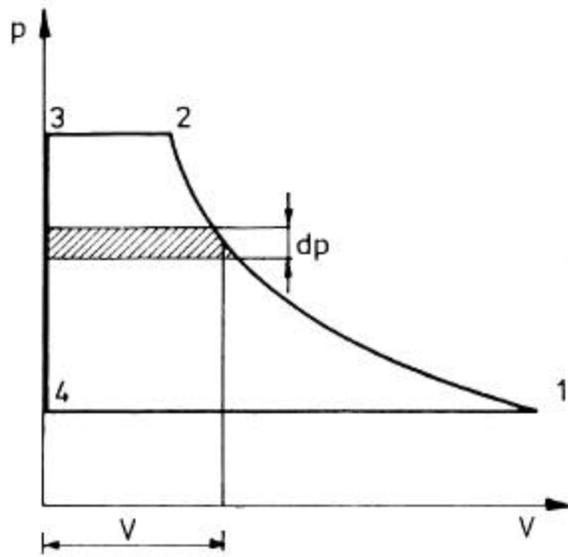


Fig. 1.7. Proceso de compresión.

Proceso	Acción sobre el gas
1-2	Compresión isentrópica de $P=P_1$ hasta $P=P_2$.
2-3	Descarga del compresor a presión constante.
3-4	Comienza el proceso de succión, a volumen constante de $P=P_3$ hasta $P=P_4$.
4-1	Continua el proceso de succión ahora a presión constante.

El trabajo politrópico viene dado por el área 1-2-3-4. De las relaciones isentrópicas se tiene:

$$V = V_1 \left(\frac{P_1}{P} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (1.54)$$

sustituyendo la ecuación (1.54) en la ecuación (1.53) y tomando $n=k$ se tiene:

$$W_{ise} = \int_{P_1}^{P_2} V dP = V_1 P_1^{1/k} \int_{P_1}^{P_2} P^{-1/k} dP \quad (1.55)$$

integrando la ecuación (1.55) se tiene:

$$W_{ise} = V_1 P_1^{1/k} \frac{k}{k-1} [P_2^{k-1/k} - P_1^{k-1/k}] \quad (1.56)$$

factorizando $P_1^{k-1/k}$ queda:

$$W_{ise} = V_1 P_1^{1/k} \frac{k}{k-1} P_1^{k-1/k} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$W_{ise} = V_1 P_1 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (1.57)$$

La ecuación (1.57) es la expresión general para el trabajo isentrópico. Ahora si se divide esta ecuación por el tiempo en segundos se tiene:

$$N_{ise} = Q_1 P_1 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (1.58)$$

La ecuación (1.58) es la expresión general para calcular la potencia en base isentrópica.

Como se puede apreciar, la ecuación (1.58) no considera las pérdidas mecánicas del compresor, ya que solo se refiere a las condiciones del fluido a la entrada y la salida del compresor, sin considerar el proceso mecánico involucrado. Por lo tanto es necesario introducir el rendimiento total del compresor:

$$\mathbf{h}_{comp} = \frac{N_{ise}}{N_{comp}} \quad (1.59)$$

entonces se reescribe la ecuación (1.58) como

$$N_{comp} = \frac{N_{ise}}{\mathbf{h}_{comp}} = Q_1 P_1 \frac{k}{\mathbf{h}_{comp} (k-1)} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (1.60)$$

Adicionalmente, se puede ampliar la ecuación (1.60) para compresores multietapas, siempre y cuando se realice enfriamiento perfecto entre cada etapa (entre cada etapa, se usa un intercambiador de calor, para enfriar el gas hasta su temperatura inicial). Entonces se tiene:

$$N_{comp} = \frac{N_{ise}}{h_{comp}} = Q_1 P_1 \frac{ne \cdot k}{h_{comp} (k-1)} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{ne \cdot k}} - 1 \right] \quad (1.61)$$

donde ne es el número de etapas del compresor.

Obtenida la potencia, con la presión de descarga y la capacidad volumétrica, se puede proceder a seleccionar un tipo de compresor. La Fig.A.3 ^[15] del **Anexo A** muestra los diferentes tipos de compresores que pueden ser seleccionados dependiendo de las condiciones del fluido.

CAPITULO II
MODELO MATEMÁTICO

MODELO MATEMATICO PARA EL CALCULO DE LA LONGITUD EQUIVALENTE

Calcular la longitud equivalente de una tubería consiste en sumar a la longitud de tramo recto de tubería, todas las pérdidas producidas por accesorios en la tubería, en m de longitud equivalente. La figura A.3 del **Anexo A** indica las pérdidas en pies de una serie de los accesorios más utilizados en tuberías, para distintos diámetros nominales de las mismas en pulgadas¹⁶.

Para calcular la longitud equivalente de la tubería a diseñar, se utiliza la siguiente ecuación:

$$L_{eq} = L + \sum_{i=1}^n K_i \quad (2.1)$$

Donde:

L_{eq} = Longitud equivalente de la tubería.

L = Longitud total del tramo recto de tubería.

K_i = Longitud de pérdida producida por un accesorio i de la tubería (Se obtiene de la fig. A.3 **Anexo A**).

MODELO MATEMÁTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO DE UNA TUBERÍA

VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO:

A los efectos de este trabajo, se consideran como parámetros de diseño, las presiones de entrada y descarga de la línea, y el diámetro de la tubería. El resto de las variables son consideradas como datos de diseño, y por lo tanto, deben ser introducidas por el usuario.

Para poder calcular un parámetro adecuado a cada diseño en particular, es necesario conocer las siguientes variables:

- El caudal Q a las condiciones estándar de presión y temperatura.
- La presión atmosférica actual P_a .
- La temperatura ambiente actual T_a .
- La temperatura promedio de flujo T_f .
- La longitud equivalente de diseño de la línea L_e .
- La gravedad específica G del gas que será transportado por la línea.
- El factor de compresibilidad Z del gas.
- Cotas de entrada y de salida de la línea z_e y z_s , respecto a la misma referencia.

Finalmente, se deben conocer las presiones de entrada y salida de la tubería, o una presión de referencia y un diámetro disponible, o también la

presión de descarga de la tubería, que a los efectos de diseño es muy utilizada, debido a que esta puede ser la presión demandada por el usuario del servicio de gas ^[14]. Además, se pueden utilizar las normas de la industria petrolera nacional las cuales permiten, conociendo solo la presión de descarga, estimar un diámetro interno de tubería tentativo para el diseño.

PRESIÓN DE DESCARGA CONOCIDA:

Cuando lo que se conoce es la presión de descarga (por solicitud de servicio), es de gran utilidad, la tabla de caídas de presión recomendadas para segmentos de 100 pies de tubería¹⁴:

CAÍDAS DE PRESIÓN RECOMENDADAS	
SERVICIO	CAÍDA DE PRESIÓN psig/100 pies de tubería
Línea de transferencia	0,5-2
Compresor (psig)	
Succión, 0-10	0,05-0,125
10-50	0,125
50-100	0,25
por encima de 200	0,50
Descarga por debajo de 50	0,125
50-100	0,25
por encima de 200	0,50

Fig. 2.1. Caídas de presión recomendadas para tuberías de gas. Fuente: Manual de Ingeniería de Diseño PDVSA Nro. 90616.1.024.1993 “Dimensionamiento de tuberías de proceso”

La figura 2.1 permite estimar la caída de presión en un tramo de 30,48m (100 pies) de tubería, dependiendo de las presiones de operación de la misma.

Tomando como referencia la presión de descarga, seleccionando un ΔP de la tabla de acuerdo a esta referencia, considerando como longitud un

segmento $L_c = 30,48$ m (100 pies de tubería), y con los datos anteriormente mencionados, es posible estimar un diámetro tentativo utilizando la ecuación de la energía de Panhandle modificada (1.49) para el segmento indicado:

$$D = \left(\frac{Q}{E \cdot C_Q} \right)^{0,3953} \cdot \left(\frac{P_0}{T_0} \right)^{0,4032} \cdot \left(\frac{L_c \cdot T_f \cdot z \cdot G^{0,961}}{(P_2 + \Delta P)^2 - e^s \cdot P_2^2} \right)^{0,2016} \quad (2.2)$$

Conocido el diámetro, se utiliza nuevamente la ecuación de Panhandle, pero ahora para la longitud total de la tubería, con la finalidad de conocer la presión de entrada a la línea:

$$P_1 = \sqrt{L \cdot T_f \cdot z \cdot G^{0,961} \cdot \left(\frac{Q}{E \cdot C_Q \cdot D^{2,53}} \right)^{1,96} \cdot \left(\frac{P_0}{T_0} \right)^2 + e^s \cdot P_2^2} \quad (2.3)$$

PRESIÓN DE ENTRADA Y DESCARGA CONOCIDAS:

Cuando las presiones de entrada y descarga de la línea son conocidas, se procede a calcular el diámetro interno de la tubería, utilizando la fórmula de Panhandle modificada. De la ecuación (2.3) despejando el diámetro, se tiene:

$$D = \left(\frac{Q}{E \cdot C_Q} \right)^{0,3953} \cdot \left(\frac{P_0}{T_0} \right)^{0,4032} \cdot \left(\frac{L e \cdot T_f \cdot z \cdot G^{0,961}}{P_1^2 - e^s \cdot P_2^2} \right)^{0,2016} \quad (2.4)$$

PRESIÓN Y DIÁMETRO CONOCIDOS:

Cuando se conocen la presión de descarga de la línea, y el diámetro interno de la tubería, la presión de entrada a la línea se calcula utilizando la fórmula de Panhandle modificada despejada para la presión de entrada (2.3).

Cuando se conocen la presión de entrada y el diámetro interno de la tubería, se calcula la presión de descarga mediante la fórmula de Panhandle modificada. De la ecuación (1.49) despejando la presión de descarga se tiene:

$$P_2 = \sqrt{\frac{P_1^2}{e^s} - \frac{L_e \cdot T_f \cdot z \cdot G^{0.961}}{e^s} \cdot \left(\frac{Q}{C_Q \cdot E \cdot D^{2.53}} \right)^{1.96} \cdot \left(\frac{P_b}{T_b} \right)^2} \quad (2.5)$$

Se debe hacer notar, que si la longitud es excesiva, o el diámetro es muy reducido, las pérdidas pueden ser tales, que no permitan el cálculo de una presión de descarga, ya que se puede producir un elemento negativo dentro de la raíz cuadrada. Por tal motivo, en caso de que los datos introducidos, no permitan estimar el cálculo de la presión de descarga, se debe incrementar el diámetro interno de la tubería, hasta producir un resultado positivo de la presión de descarga. Debido a que la configuración geométrica de un diseño de tubería está definido por condiciones geográficas, variar la longitud de la tubería no ofrece una solución viable en la mayoría de los casos.

Para los tres casos anteriores, y con los resultados obtenidos, se debe calcular la velocidad máxima del flujo, que no es más que la velocidad en la descarga de la línea, para compararla con la velocidad límite de erosión para diseño. Para calcular la velocidad máxima, se debe calcular el caudal en la descarga de la línea:

$$Q_2 = \frac{P_0}{P_2} \cdot \frac{T_f}{T_0} \cdot Q_{std} \quad (2.6)$$

donde Q_2 es el caudal en el punto de descarga de la tubería.

Ahora que se conoce el caudal en la descarga de la tubería, y el diámetro, se puede calcular la velocidad máxima de flujo:

$$v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\rho \cdot D^2} \quad (2.7)$$

Para calcular la velocidad de erosión, es necesario conocer la densidad del fluido en el punto de descarga:

$$\rho_2 = \frac{P_2 \cdot M}{R \cdot T_f} = \frac{P_2 \cdot G \cdot M_{Aire}}{R \cdot T_f} \quad (2.8)$$

Ahora, conocida la densidad, se calcula la velocidad límite de erosión para diseño de línea:

$$v_e = \frac{100}{\sqrt{r}} \quad (2.9)$$

Conocidas la velocidad máxima de flujo, y la velocidad límite de erosión, se deben comparar ambos valores. Si la velocidad máxima de flujo es menor que la velocidad límite de erosión para diseño, y que por lo tanto, la construcción de la misma es posible, desde el punto de vista del flujo.

MODELO MATEMATICO PARA EL CÁLCULO DE REDES DE TUBERIAS

VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DE LA RED:

VARIABLES DE LA RED:

Existe un grupo de variables que se aplican a todo el desarrollo del proceso de cálculo de la red de tuberías de gas, las cuales son:

- Presión atmosférica promedio de la red P_a .
- Temperatura ambiental promedio de la red T_a .
- Temperatura media de flujo de la red T_f .
- Gravedad específica del gas que circula por la red (Se supone la composición química del gas natural como fija para toda la red).

Estas variables influyen sobre todos los cálculos de diseño de la red, por lo cual son condiciones de diseño características de la misma.

VARIABLES DE LOS TRAMOS:

Los tramos de tubería están definidos por dos variables que son:

- Diámetro interno de la tubería D .
- Longitud equivalente del tramo de tubería L_{eq} .

VARIABLES DE LOS NODOS:

Cada nodo de la red, está definido por las siguientes variables:

- Si el nodo es un suministro o una descarga de la red, existe un caudal de carga de la red Q_{carga} .
- Una presión P que puede ser fija, si es conocida, o supuesta si se desea calcular.
- Una elevación z referida al mismo plano de referencia que los nodos.

METODOS DE CÁLCULO DE LA RED

GENERALIDADES:

Todos los métodos que aquí se estudiarán son iterativos, y consisten en satisfacer la ecuación de continuidad (1.52) en los nodos y la ecuación de la energía de Panhandle modificada (1.49) en los tramos, además de que requieren valores iniciales para alcanzar una solución. En lo que difieren es en la estructura de cálculo de la red, en el número de iteraciones requeridas, y en la complejidad del algoritmo de cálculo de la red.

LINEALIZACION DE LA ECUACION DE LA ENERGIA:

La ecuación de la energía de Panhandle (1.49) es una ecuación no lineal, por lo que, para los efectos de cálculo, se puede obtener una expresión lineal que facilite el algoritmo de cálculo, aprovechando que todos los procedimientos de cálculo descritos posteriormente son iterativos.

De la ecuación de la energía de Panhandle (1.49) se tiene:

$$Q = E \cdot C_Q \cdot \left(\frac{T_b}{P_b} \right)^{1.020} \cdot D^{2.530} \cdot \frac{(P_1^2 - e^s \cdot P_2^2)^{0.51}}{(L_e \cdot T_f \cdot Z \cdot G^{0.961})^{0.51}} \quad (2.10)$$

la ecuación (2.10) puede escribirse como:

$$Q = Ctte_1 \cdot (P_1^2 - e^s \cdot P_2^2)^{0.51} \quad (2.11)$$

donde:

$$Ctte_1 = \frac{E \cdot C_Q \cdot D^{2.53}}{(L_e \cdot T_f \cdot Z \cdot G^{0.961})^{0.51}} \left(\frac{T_a}{P_a} \right)^{1.02} \quad (2.12)$$

la ecuación 2.12 puede ser reescrita como:

$$Q = Ctte_1 \cdot \frac{P_1^2 - e^s \cdot P_2^2}{(P_1^2 - e^s \cdot P_2^2)^{0.49}} \quad (2.13)$$

Ahora, si se considera al denominador de la ec. (2.13) como constante (solo para cada iteración), se puede definir $Ctte_2$ como:

$$Ctte_2 = (P_1^2 - e^s \cdot P_2^2)^{0.49} \quad (2.14)$$

sustituyendo la ecuación 2.14 en la ecuación 2.13 queda:

$$Q = \frac{Ctte_1}{Ctte_2} \cdot (P_1^2 - e^s \cdot P_2^2) \quad (2.15)$$

considerando para linealizar:

$$M_1 = P_1^2 \quad M_2 = P_2^2 \quad Const = \frac{Ctte_1}{Ctte_2} \quad (2.16)$$

sustituyendo las ecuaciones 2.16 en la ecuación 2.15 finalmente queda:

$$Q = Const \cdot (M_1 - e^s \cdot M_2) \quad (2.17)$$

La ecuación puede ser considerada como la expresión de la ecuación de la energía de Panhandle para flujo isotérmico linealizada para los efectos de programación.

METODO DE HARDY-CROSS:

En principio, este método fue concebido para redes fluidos incompresibles, y luego fue extendido su uso para redes de fluidos compresibles a bajas presiones.

Para garantizar convergencia del método, se debe satisfacer la ecuación de continuidad (1.52) en los nodos y la ecuación de la energía (1.49) en los lazos ^[8]. Además, se debe añadir el sentido de flujo en cada lazo de la red.

Para cada lazo, se calcula un factor de ajuste de caudales, garantizando siempre la continuidad en los nodos. El proceso se repite hasta que los ajustes de caudales de la iteración actual menos los ajustes de la iteración anterior, sean menores a una tolerancia dada. Luego de calcular los caudales, se calculan las nuevas presiones, determinándose a partir de estas, las nuevas propiedades del gas y los nuevos caudales, comenzando así una nueva iteración general que comienza con la corrección de los nuevos caudales. El cálculo culmina cuando las diferencias entre las presiones de la iteración actual y los de la iteración anterior son menores a una tolerancia establecida.

Este método presenta las ventajas de requerir poco espacio de almacenamiento en la memoria del computador y que la convergencia es siempre alcanzada. Las limitaciones de este método radican en que el usuario debe establecer los lazos de la red, para luego incluirlos en el proceso de cálculo y que la ejecución del cálculo es lenta debido a que se calcula primero la corrección de caudales y luego las presiones por cada iteración.

METODO DE SUSTITUCIONES SUCESIVAS DE ECUACIONES:

Este método consiste en establecer la ecuación de continuidad en cada nodo, incluyendo los posibles caudales de carga (suministro o descarga), y suponiendo las presiones en los nodos. De esta forma, se estudia la influencia de cada nodo sobre los nodos adyacentes.

El proceso se inicia estableciendo la ecuación de la continuidad en un nodo. Luego, los caudales de cada tramo son sustituidos por su respectiva ecuación de la energía. En el ejemplo de la fig. 2.2:

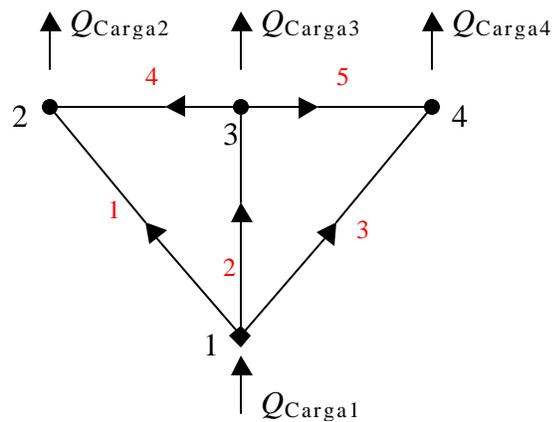


Fig. 2.2. Red de tuberías de gas

la ecuación de la continuidad en el nodo 1 tiene la forma:

$$Q_{Carga1} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2.18)$$

sustituyendo ahora la ecuación de la energía para cada caudal, en la ec. 2.18 queda:

$$Q_{Carga1} = Const_1 \cdot (M_1 - e^{s1} \cdot M_2) + Const_2 \cdot (M_1 - e^{s2} \cdot M_3) + Const_3 \cdot (M_1 - e^{s3} \cdot M_4) \quad (2.19)$$

y despejando M_1 de la ec. (2.19) queda:

$$M_1 = \frac{Q_{Carga1} + Const_1 \cdot e^{s1} \cdot M_2 + Const_2 \cdot e^{s2} \cdot M_3 + Const_3 \cdot e^{s3} \cdot M_4}{M_2 + M_3 + M_4} \quad (2.20)$$

En la ecuación 2.20 la nueva incógnita es la presión linealizada M_1 , calculada a partir de las presiones supuestas, y pasando a ser el dato para la siguiente iteración. Si en el nodo actual la presión es fija, ésta no se sustituye durante el proceso iterativo considerándose constante. Este proceso se repite hasta que la diferencia entre las presiones de los nodos de la iteración actual y los de la iteración anterior es menor a una tolerancia predeterminada.

Las ventajas de este método radican en la facilidad para realizar los cálculos, no requiere establecer ninguna condición referente a los lazos, y como resuelve la ecuación de la continuidad en los nodos y de la energía en los tramos simultáneamente, se requiere de poco espacio de memoria en el computador.

Las desventajas que presenta este método están en que solo converge, si se suponen correctamente los sentidos de flujo en los tramos y la convergencia se alcanza en un número de iteraciones relativamente elevado debido a que el cálculo se realiza nodo por nodo.

METODO DE SOLUCION SIMULTANEA DE ECUACIONES:

Al igual que el método anterior, este método consiste en satisfacer la ecuación de continuidad en los nodos, y de la energía en los tramos, con la diferencia de que en este caso se genera un sistema de ecuaciones linealizadas, donde las incógnitas son las presiones y el cual puede ser resuelto por un método directo, sustituyendo los resultados obtenidos por los valores de presión introducidos anteriormente, lo que lleva a un proceso iterativo que termina cuando los valores obtenidos difieren de los anteriores en una tolerancia preestablecida. En los nodos de presión fija, no se forma la ecuación de la continuidad, y en las ecuaciones restantes, esta presión pasa a formar parte del término independiente.

Las ventajas de este método son que converge en un número de iteraciones relativamente bajo y que la presión puede ser fijada en varios nodos.

Las principales desventajas están en que el algoritmo de cálculo es más complejo, ya que requiere el análisis de todas las ecuaciones en cada iteración y como en el método anterior, se requiere que el sentido de flujo de los tramos coincida con las caídas de presión.

Volviendo al ejemplo de la figura, y satisfaciendo la ecuación de la continuidad (1.52) en los nodos, se tiene:

$$\begin{array}{rcccccc}
 \text{Nodo} & & & & & & \\
 1 & -Q_1 & -Q_2 & -Q_3 & & = -Q_{C \arg a 1} \\
 2 & Q_1 & & & +Q_4 & = Q_{C \arg a 2} \\
 3 & & Q_2 & & -Q_4 & -Q_5 = Q_{C \arg a 3} \\
 4 & & & Q_3 & & +Q_5 = Q_{C \arg a 4}
 \end{array} \quad (2.21)$$

Como se observa en el sistema de ecuaciones 2.21, se tienen cuatro ecuaciones con cinco incógnitas, con lo cual se tendrían infinitos caudales que cumplen con el sistema de ecuaciones. Ahora, sustituyendo la ecuación de la energía para cada tramo y reordenando para cada presión se tiene:

$$\begin{array}{rcccccc}
 -(cons1 + cons2 + cons3)M_1 & + cons1 \cdot e^{s1}M_2 & + cons2 \cdot e^{s2}M_3 & + cons3 \cdot e^{s3}M_4 & = -Q_{C \arg a 1} \\
 cons1 \cdot M_1 & -(cons1 \cdot e^{s1} + cons4 \cdot e^{s4})M_2 & + cons4 \cdot e^{s4}M_3 & & = -Q_{C \arg a 2} \\
 cons2 \cdot M_1 & + cons4 \cdot e^{s4}M_2 & -(cons2 + cons4 + cons5)M_3 & + cons5 \cdot e^{s5}M_4 & = -Q_{C \arg a 3} \\
 cons3 \cdot M_1 & & + cons5 \cdot M_3 & -(cons3 \cdot e^{s3} + cons5 \cdot e^{s5})M_4 & = -Q_{C \arg a 4}
 \end{array} \quad (2.22)$$

El sistema de ecuaciones (2.22) es de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas. Si además se supone una de las presiones como fija, se elimina la fila de la ecuación correspondiente a dicha presión, y los elementos de la columna correspondiente a esta, pasan a formar parte de los términos independientes. Suponiendo para este caso la presión 3 como fija:

$$\begin{array}{rcccccc}
 -(cons1 + cons2 + cons3)M_1 & + cons1 \cdot e^{s1}M_2 & + cons3 \cdot e^{s3}M_4 & = -Q_{C \arg a 1} - cons2 \cdot e^{s2}M_3 \\
 cons1 \cdot M_1 & -(cons1 \cdot e^{s1} + cons4 \cdot e^{s4})M_2 & & = Q_{C \arg a 2} - cons4 \cdot e^{s4}M_3 \\
 cons3 \cdot M_1 & & -(cons3 \cdot e^{s3} + cons5 \cdot e^{s5})M_4 & = Q_{C \arg a 4} - cons5 \cdot M_3
 \end{array} \quad (2.23)$$

El sistema de ecuaciones (2.23) es de tres ecuaciones con tres incógnitas, obteniéndose entonces las presiones supuestas a partir de la presión fija.

Comparando los tres métodos antes expuestos, todos requieren al menos una presión fija. Los métodos de sustituciones sucesivas y de solución simultánea solo requieren que se estimen las presiones en los nodos. El método de Hardy-cross requiere adicionalmente suponer los caudales en los tramos. El método de soluciones sucesivas resuelve las ecuaciones por separado, mientras que el de solución simultánea de ecuaciones, resuelve el sistema de ecuaciones linealizadas. El método de solución de redes de tuberías utilizado en este trabajo es el de solución simultánea de ecuaciones, por las ventajas antes mencionadas, y por considerarse el método más directo de solución.

MÉTODOS NUMÉRICOS DE SOLUCIÓN DE SISTEMAS DE ECUACIONES:

Existen múltiples métodos numéricos para resolver el tipo de sistema de ecuaciones que se presenta en el método seleccionado de solución de las redes de tuberías. Estos métodos se dividen en directos e indirectos (iterativos). Entre los métodos indirectos destacan el de Jacobi y el Gauss-Seidel ^[17]. Estos métodos requieren despejar las incógnitas de cada ecuación, para realizar iteraciones sustitutivas hasta que una tolerancia indicada sea

alcanzada. Estos métodos tienen el inconveniente de que no siempre convergen a una solución, además de que el proceso principal de cálculo ya es iterativo, y por lo tanto incluir un método de cálculo indirecto solo incrementaría el tiempo de cálculo, haciendo poco eficiente dicho proceso. En vista de esto, se prefirió el uso de procedimientos directos de cálculo que consisten en eliminación Gaussiana o en factorización de matrices. El método de eliminación Gaussiana funciona bien para sistemas de ecuaciones pequeños, y tiene pocas aplicaciones computacionales, debido a que se debe reconstruir la matriz, transformándola en triangular superior, para poder resolver el sistema de ecuaciones a través de una sustitución hacia atrás.

Los métodos de factorización directa de matrices, consisten principalmente en escribir una matriz A , como el producto de una matriz triangular inferior L y una matriz triangular superior U . Cuando esta factorización es posible, el sistema de ecuaciones tiene solución única. El sistema de ecuaciones $Ax = LUx = b$ puede ser transformado en el sistema $Ux = L^{-1}b$ y por ser U una matriz triangular superior se puede aplicar una sustitución hacia atrás para resolver el sistema^[17]. Todos los elementos de la matriz A pueden ser utilizados para hallar los elementos de la matriz L y los de la matriz U .

El método de Doolittle, consiste en seleccionar arbitrariamente los valores de la diagonal principal de L iguales a uno ($l_{11} = l_{22} \dots = l_{nn} = 1$). Otro método conocido como método de Crout, requiere que los elementos de la diagonal principal de U sean la unidad ($u_{11} = u_{22} \dots = u_{nn} = 1$) y otro método,

conocido como método de Choleski, requiere que los elementos de la diagonal principal de U sean iguales a los elementos de la diagonal principal de L . Como se dijo anteriormente, el método de factorización directa requiere que el sistema $Ax = b$ sea escrito como $LUx = b$. Una primera sustitución, hacia delante, resuelve el sistema $Lz = b$, para luego realizar la siguiente sustitución, ahora hacia atrás, que resuelve el sistema $Ux = z = L^{-1}b$, obteniéndose los valores de x .

El método utilizado en este trabajo para resolver sistemas de redes de tuberías es el método de factorización directa de ecuaciones de Doolittle, cuyo algoritmo de cálculo se presenta en el **Anexo B**.

MODELO MATEMÁTICO DE SELECCIÓN DE COMPRESORES

VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL CALCULO DE COMPRESORES:

Las siguientes variables se requieren para llevar a cabo el proceso de selección de compresores:

- Caudal que debe manejar la unidad compresora Q_{comp} .
- Temperatura inicial T_i .
- Presión de entrada a la unidad P_1 .
- Presión de salida de la unidad P_2 .
- Gravedad específica del gas G .
- Número de etapas supuesto para el compresor ne .

Utilizando el valor de caudal y de presión de descarga, se procede a seleccionar el tipo de compresor, a través de las siguientes condiciones, extraídas de la fig. A.2 del **Anexo A**, donde se tienen los caudales en m^3/h y las presiones en psi:

- Si $0,932 \leq Q \leq 5,5922 \text{ m}^3/\text{h}$ y $10 \leq P_2 \leq 60000 \text{ psi}$ se recomiendan compresores del tipo:

De diafragma.

- Si $5,5922 \leq Q \leq 9,3204 \text{ m}^3/\text{h}$ y $6000 \leq P_2 \leq 60000 \text{ psi}$ se recomiendan compresores del tipo:

De diafragma.

- Si $5,5922 \leq Q \leq 55,9224 \text{ m}^3/\text{h}$ y $10 \leq P_2 \leq 6000 \text{ psi}$ se recomiendan compresores del tipo:

De embolo lubricado o sin lubricar.

- Si $55,9224 \leq Q \leq 1864,08 \text{ m}^3/\text{h}$ y $300 \leq P_2 \leq 6000 \text{ psi}$ se recomiendan compresores del tipo:

De embolo lubricado o sin lubricar.

- Si $5,5922 \leq Q \leq 55,9224 \text{ m}^3/\text{h}$ y $40 \leq P_2 < 300 \text{ psi}$ se recomiendan compresores del tipo:

De tornillo.

De embolo lubricado o sin lubricar.

- Si $55,9224 \leq Q \leq 1864,08 \text{ m}^3/\text{h}$ y $10 \leq P_2 < 40 \text{ psi}$ se recomiendan compresores del tipo:

De paletas deslizantes.

De embolo lubricado o sin lubricar.

De émbolos rotativos.

- Si $1864,08 \leq Q \leq 9320,399 \text{ m}^3/\text{h}$ y $300 \leq P_2 \leq 6000 \text{ psi}$ se recomiendan compresores del tipo:
 - Centrífugo radial.
 - De embolo lubricado o sin lubricar.

- Si $1864,08 \leq Q \leq 9320,399 \text{ m}^3/\text{h}$ y $10 \leq P_2 < 300 \text{ psi}$ se recomiendan compresores del tipo:
 - Centrífugo radial.
 - De embolo lubricado o sin lubricar.
 - De tornillo.

- Si $9319,07 \leq Q \leq 93203,99 \text{ m}^3/\text{h}$ y $10 \leq P_2 \leq 6000 \text{ psi}$ se recomiendan compresores del tipo:
 - Centrífugo radial.

- Si $93203,99 \leq Q \leq 932039,9 \text{ m}^3/\text{h}$ y $10 \leq P_2 \leq 60000 \text{ psi}$ se recomiendan compresores del tipo:
 - Centrífugo axial.

- Si $9,320399 \leq Q \leq 9320,399 \text{ m}^3/\text{h}$ y $6000 \leq P_2 \leq 12000 \text{ psi}$ se recomiendan compresores del tipo:
 - De embolo lubricado.

- Si $9,320399 \leq Q \leq 9320,399 \text{ m}^3/\text{h}$ y $12000 \leq P_2 \leq 60000 \text{ psi}$ se recomiendan compresores del tipo:

De presión máxima.

Antes de calcular la potencia isentrópica del compresor, es necesario calcular el exponente isentrópico k . Este se calcula de la ecuación 1.12 y es dependiente del calor específico a presión constante, que a su vez se obtiene de la ecuación 1.14.

La potencia isentrópica del compresor se calcula a partir de la ecuación 1.60.

CAPITULO III
ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

GENERALIDADES:

El programa para el análisis de flujo compresible consiste en una aplicación de 32 bits que consta básicamente de cuatro módulos de cálculo, los cuales se distribuyen de la siguiente manera:

- 1.- Módulo para el cálculo de la longitud equivalente.
- 2.- Módulo para la selección del diámetro óptimo.
- 3.- Módulo para el cálculo de redes de tuberías.
- 4.- Módulo para la selección de compresores.

La interacción entre el usuario y el programa es sencilla, ya que el mismo consta de formularios o ventanas, que facilitan la introducción de datos por parte del usuario, minimizando así el uso de ayudas externas. Sin embargo, este capítulo representa una guía para el uso adecuado de esta herramienta de cálculo.

ENTRADA:

Para acceder al programa, el usuario debe hacer click en el icono AFC.exe en el directorio Tesis de la unidad de CDRom. Al iniciar debe aparecer el siguiente formulario:

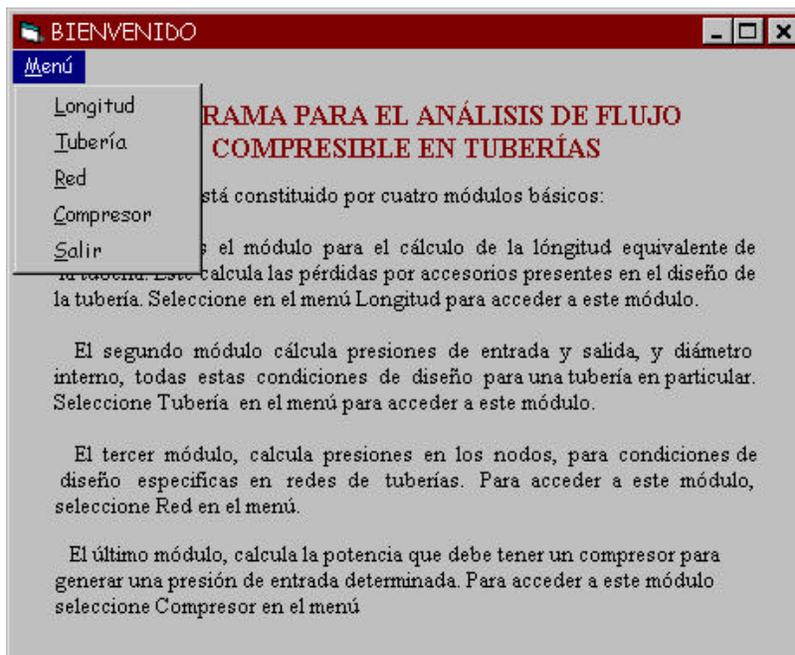


Fig. 3.1. Formulario de entrada al programa

En este formulario, aparece un pequeño resumen de cómo acceder a las distintas opciones del menú, y en que consiste cada una de estas. Al ingresar al menú, Aparecen las siguientes opciones:

- 1.- Longitud
- 2.- Tubería
- 3.- Red
- 4.- Compresor

Los cuales representan el acceso a los módulos mencionados al principio de este capítulo.

EL MODULO LONGITUD:

Al acceder al comando longitud en el menú, el siguiente formulario aparecerá en pantalla:

Cálculo de Longitud Equivalente

Indique en los datos de diseño, la longitud de tramo recto de tubería, y el diámetro nominal de la misma:

L= Dn= pulg

Indique ahora, el número de accesorios presente en la tubería:

	Nro. de elementos	Nro. de elementos
Codo estándar 90 grados	<input type="text"/>	Válvula de compuerta <input type="text"/>
Codo 90 grados radio largo	<input type="text"/>	Válvula de retención deslizante <input type="text"/>
Codo estándar 45 grados	<input type="text"/>	Válvula angular 90 grados <input type="text"/>
"T" de línea de flujo	<input type="text"/>	<input type="radio"/> Entrada redondeada <input type="radio"/> Entrada de Filos rectos <input type="radio"/> Entrada proyectada dentro del tanque
"T" de ramal de flujo	<input type="text"/>	
Codo estándar 180 grados	<input type="text"/>	
Válvula de globo	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/> salida de la tubería

Aceptar Salir

Fig. 3.2 Formulario de datos. Longitud equivalente

Para calcular la longitud equivalente de la tubería, el usuario debe introducir la longitud de tramo recto de tubería en la unidad de su preferencia, el diámetro nominal de la tubería en pulg, y luego debe introducir el número de accesorios de cada tipo presentes en la tubería. Al aceptar, Aparecerá un nuevo formulario, donde se indicará la longitud equivalente de la tubería en metros y pies. Si en el nuevo formulario, marca la casilla indicada para utilizar el valor obtenido en el futuro, al ingresar al módulo de cálculo de tuberías, el valor de la longitud equivalente calculada, aparecerá automáticamente en la casilla L_{eq} del formulario de datos para calcular los parámetros de diseño fig. (3.2). El algoritmo de cálculo de la longitud es mostrado en la fig. (3.3).

EL MODULO DE DISEÑO DE TUBERÍAS:

Este módulo tiene como finalidad calcular el diámetro, presiones de entrada y salida (parámetros de diseño), y velocidades máxima y de erosión, a partir de los datos de diseño.

Al acceder a tubería en el menú de entrada, aparece un formulario donde se le solicita al usuario que indique el sistema de unidades en el que desea que le sean entregados los resultados. Seguidamente, se accede al formulario de ingreso de datos y parámetros de diseño fig. (3.4).

En dicho formulario deben introducirse los datos de diseño: Caudal Q , presión estándar P_0 , temperatura estándar T_0 , temperatura de flujo T_f , longitud

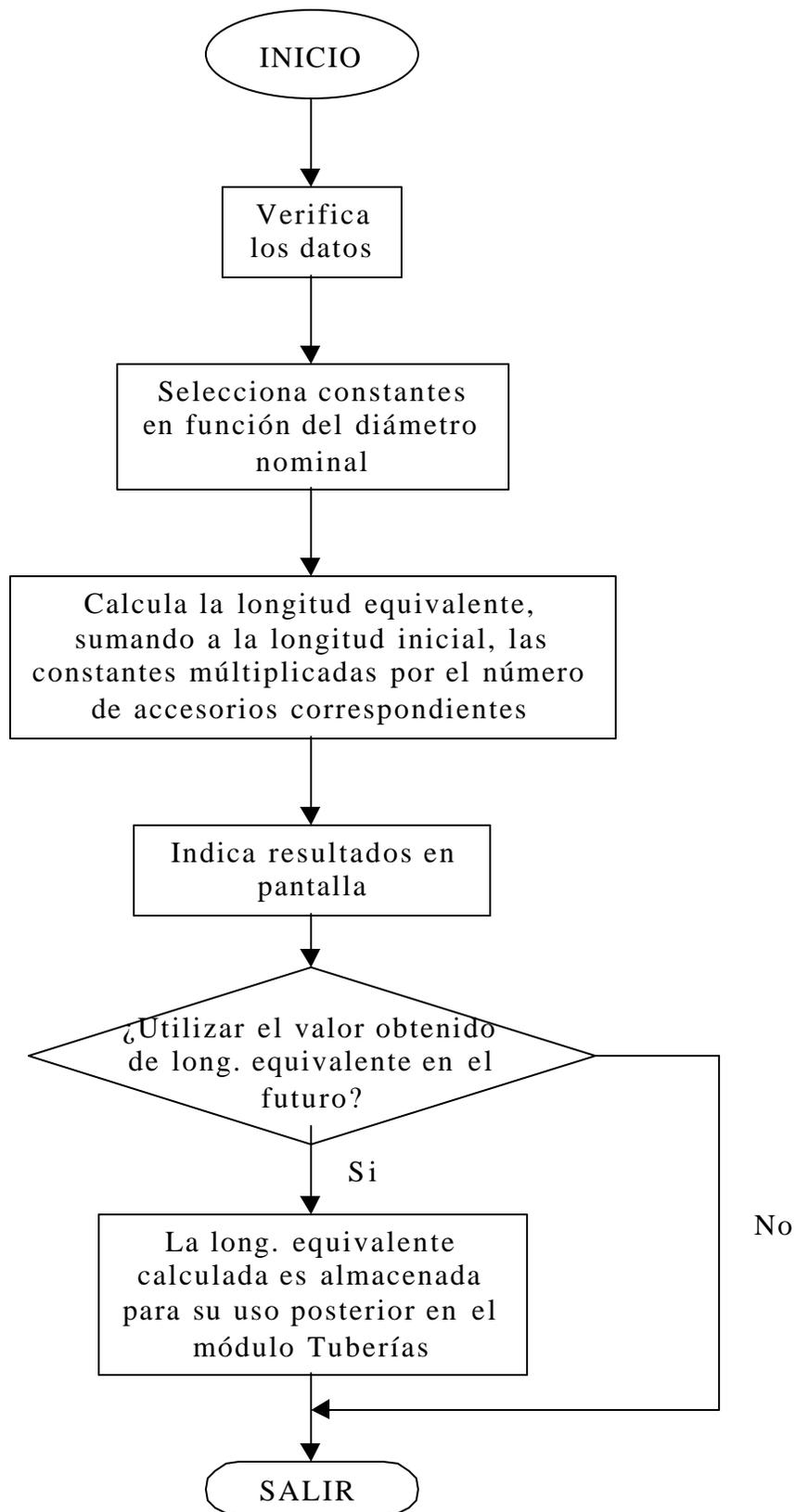


Fig.3.3 Algoritmo para el cálculo de la longitud equivalente.

equivalente de la tubería L_e , la gravedad específica G , la cota de la entrada de la tubería h_e , la cota de salida h_s , y los parámetros de diseño. Los parámetros de diseño se pueden incorporar al programa con las siguientes combinaciones:

- 1.- Presión de descarga conocida.
- 2.- Presión de entrada y descarga conocidas.
- 3.- Presión de entrada y diámetro conocidos.
- 4.- Presión de descarga y diámetro conocidos.

Introduzca los datos de diseño para calcular el diámetro

Q =

Pa =

Ta =

Tf =

L =

G =

he =

hs =

Indique dos datos de diseño conocidos o indique una presión de descarga conocida:

P1 =

P2 =

Dint =

Aceptar Anterior Salir

Fig. 3.4 Formulario de datos para cálculo de tuberías.

Cualquiera de estas combinaciones arroja la configuración de presión de entrada, presión de descarga y diámetro interno de la tubería. En forma interna, el programa calcula la velocidad máxima y de erosión, para luego compararlas y establecer si el sistema es seguro desde el punto de vista de velocidad del flujo. Los resultados de la corrida del programa aparecen descritos en un formulario de resultados el cual ofrece una opción para imprimir los mismos.

Al aceptar, el usuario podrá modificar los datos de entrada, en función de mejorar su diseño. La fig. 3.5 muestra el algoritmo utilizado por el programa para calcular los parámetros de diseño de la tubería.

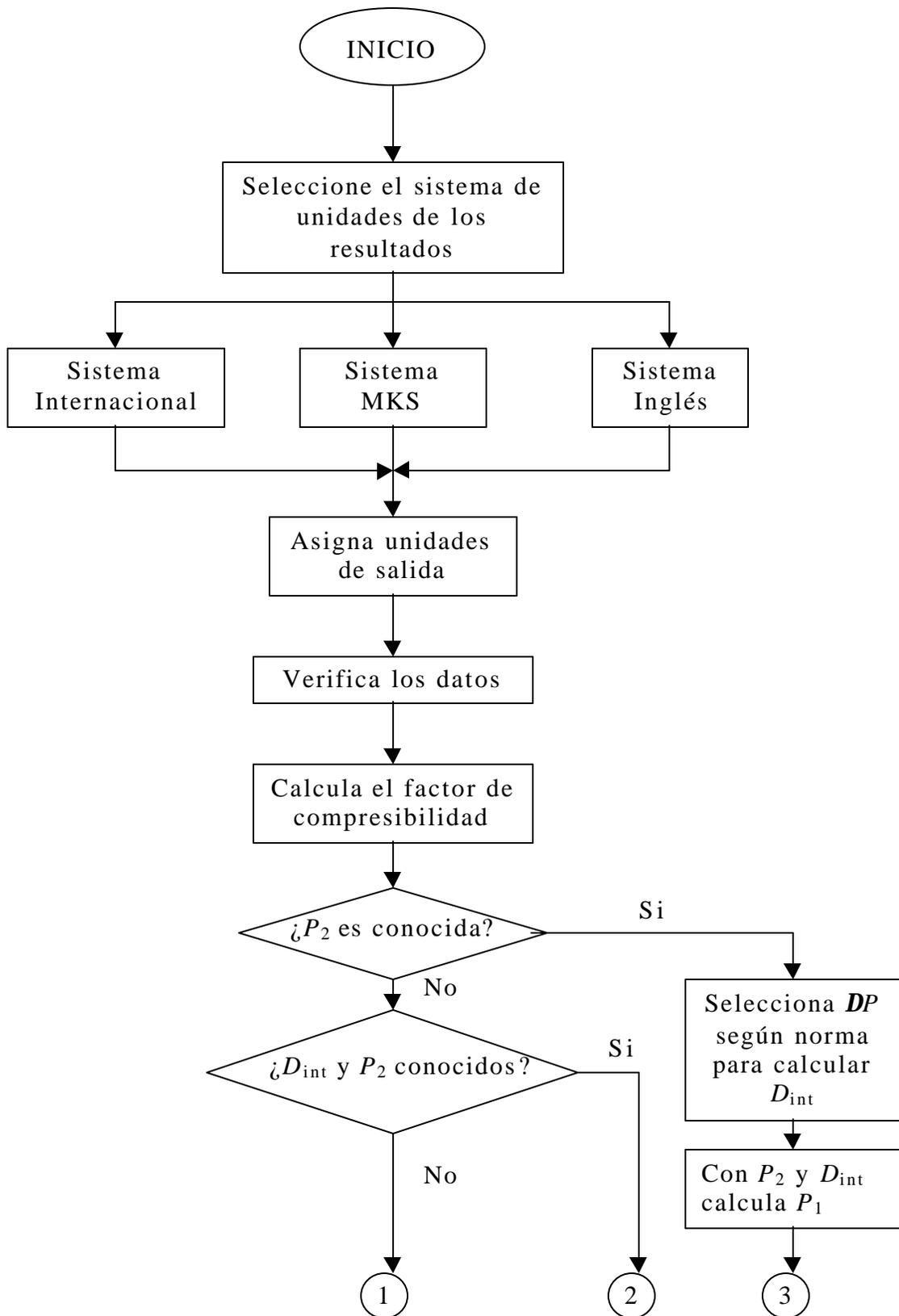


Fig. 3.5 Algoritmo para el cálculo de tuberías

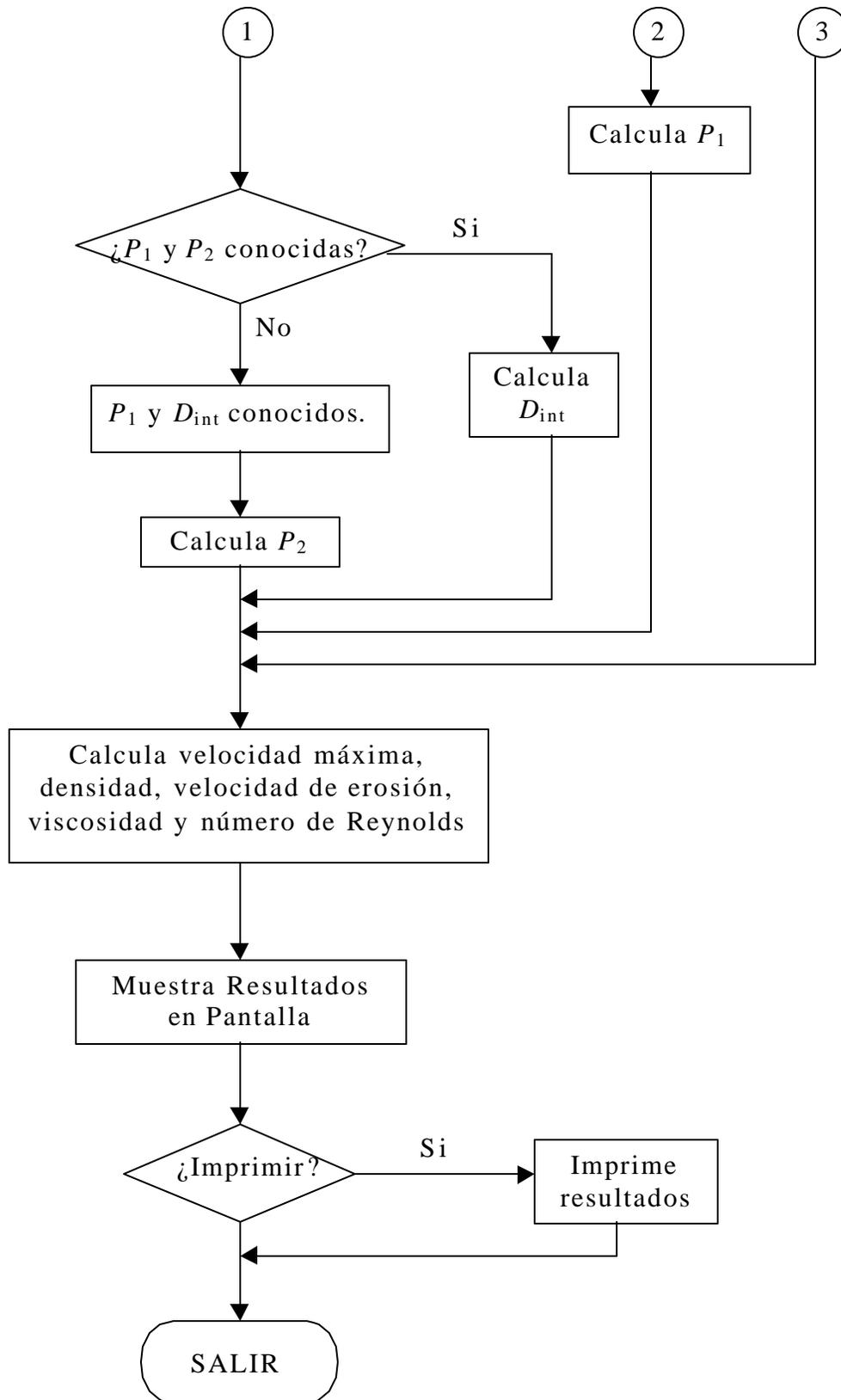


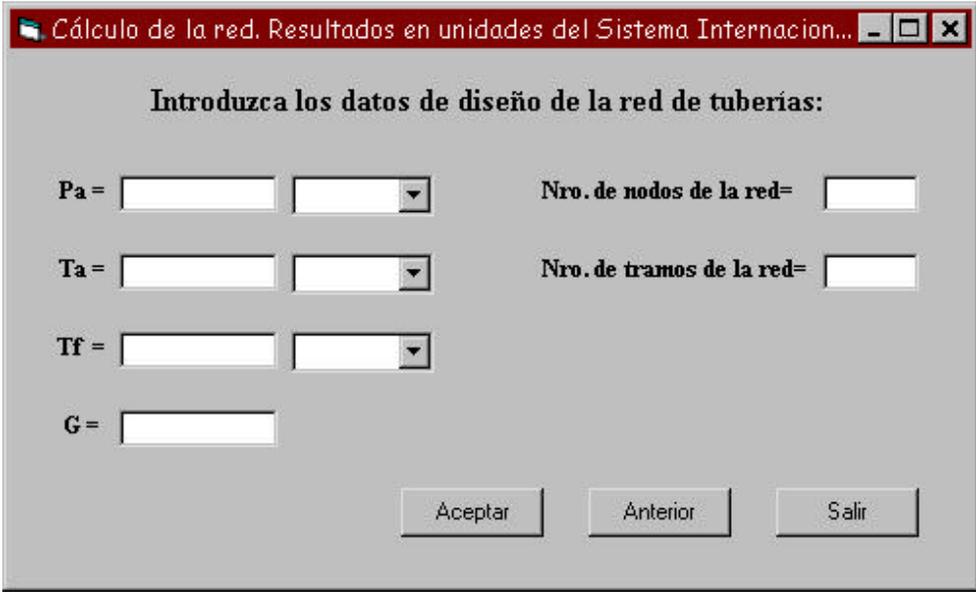
Fig 3.5. (Continuación) Algoritmo para el cálculo de tuberías.

EL MODULO DE REDES DE TUBERIAS:

Este módulo tiene como finalidad, calcular las presiones, densidades y viscosidades en los nodos y los caudales, velocidades máximas, velocidades de erosión y números de Reynolds en los tramos, de redes de tuberías a diseñar o existentes, pudiendo ser estas abiertas o cerradas.

Al acceder a red en el menú de entrada, aparece un formulario donde se le solicita al usuario que indique el sistema de unidades en el que desea que le sean entregados los resultados. Seguidamente, se accede al formulario de ingreso de datos de diseño de la red. (fig.3.6).

En dicho formulario deben introducirse los datos de diseño de la red: presión atmosférica P_a , temperatura ambiental T_a , temperatura de flujo T_f , el número de nodos y el número de tramos de la red.



The image shows a software window with a title bar that reads "Cálculo de la red. Resultados en unidades del Sistema Internacion...". The window contains a form titled "Introduzca los datos de diseño de la red de tuberías:". The form has five input fields and three buttons. The first three fields are for atmospheric pressure (P_a), ambient temperature (T_a), and flow temperature (T_f), each with a text box and a dropdown menu. The fourth field is for the number of nodes ("Nro. de nodos de la red=") and the fifth for the number of segments ("Nro. de tramos de la red="), both with text boxes. The fifth field is for flow rate ("G=") with a text box. At the bottom, there are three buttons: "Aceptar", "Anterior", and "Salir".

Fig. 3.6 Formulario de datos generales. Red de tuberías

Luego de introducir los datos de la red, comienza un proceso iterativo en el cual se deben introducir los datos de diseño de los tramos. El número de iteraciones viene dado por el número de tramos de la red. En cada iteración, aparece un formulario (Fig.3.7) en el que se deben introducir: El nodo de entrada, el nodo de salida, el diámetro interno y la longitud del tramo.

Datos de los tramos de la red . Resultados en SI

Datos de los tramos de la red

Datos del tramo Nro.: 1

Nodo de entrada: Dint=

Nodo de salida: L =

Fig. 3.7 Formulario de datos de los nodos de la red.

Al terminar de introducir todos los datos de la red, comienza un proceso iterativo en el cual se deben introducir los datos de diseño de los nodos. El número de iteraciones, viene dado por el número de nodos de la red. En cada iteración, aparece un formulario (fig. 3.8) en el que se deben introducir: El caudal de carga (si el nodo es un suministro o descarga), presión (fija o supuesta, dependiendo del caso), y la elevación a la que se encuentra ubicada el nodo.

Presiones y Caudales de carga de la red

Caudal de carga en el nodo 1

El caudal de carga:

Entra al nodo $Q =$

Sale del nodo

Presión en el nodo 1

Presión fija $P =$

Cota del nodo 1

$h =$

Fig. 3.8. Formulario de datos de los tramos

Luego de introducir todos los datos de los nodos, se lleva a cabo el proceso de cálculo relacionado, para luego arrojar los resultados, que están separados en resultados de los nodos y resultados de los tramos, ofreciendo al usuario la oportunidad de imprimir un informe detallando los datos introducidos y los resultados obtenidos. Las figuras indican el algoritmo de cálculo de la red de tuberías.

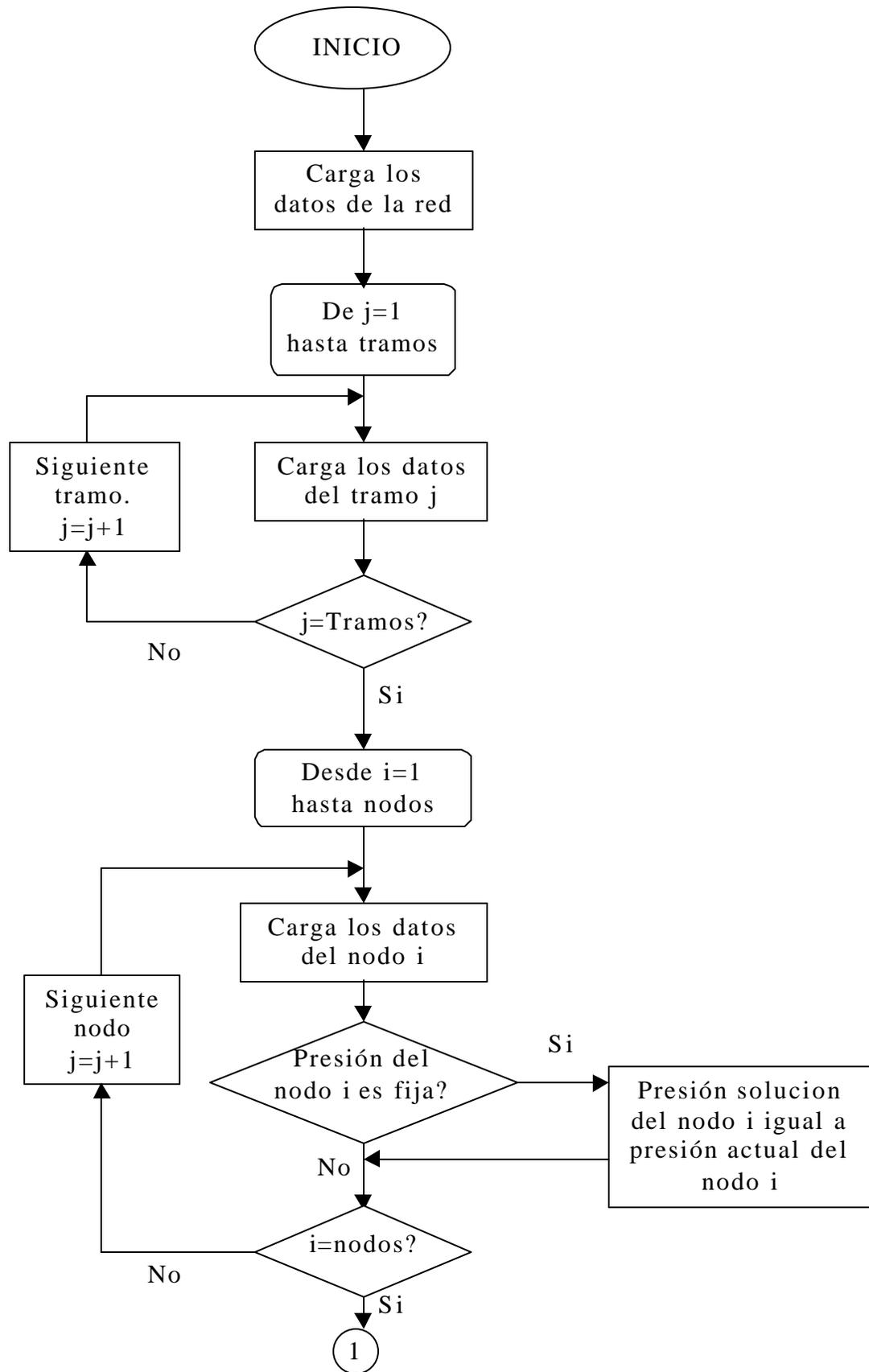


Fig. 3.9 Algoritmo de cálculo de la red

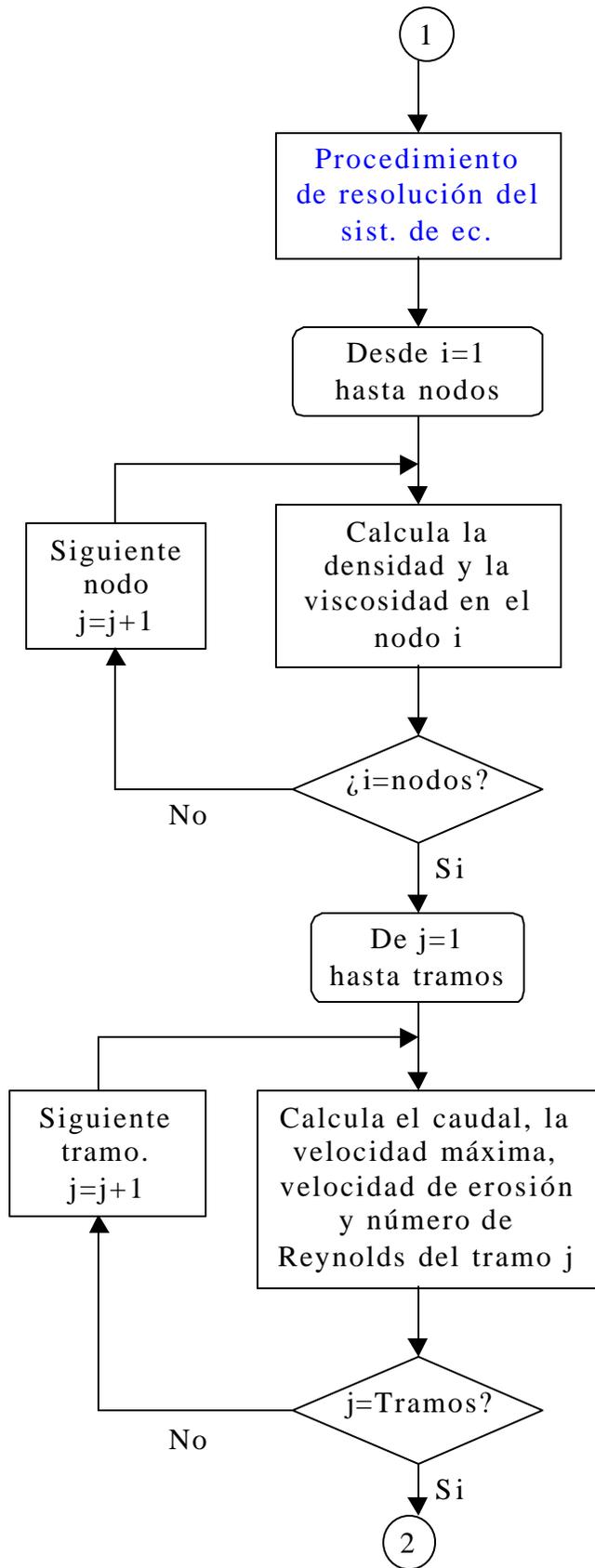


Fig. 3.9 (continuación) Algoritmo de cálculo de la red

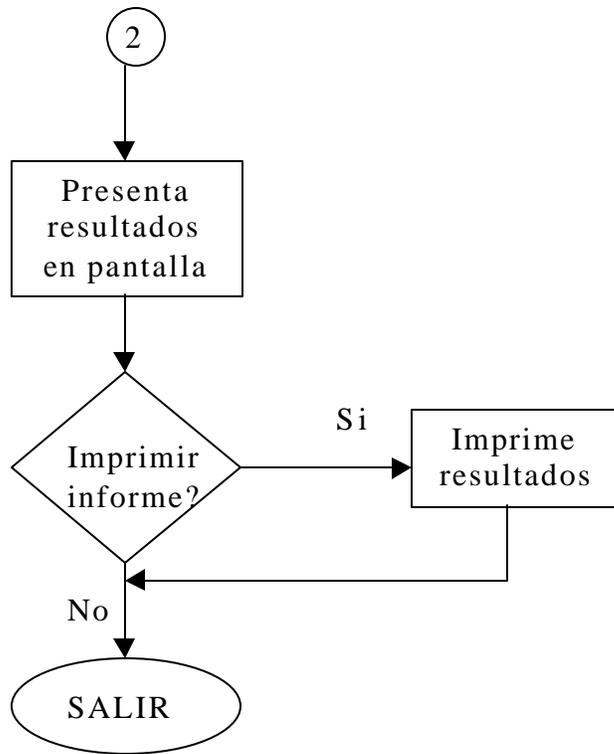


Fig. 3.9 (continuación) Algoritmo de cálculo de la red

El procedimiento de resolución del sistema de ecuaciones, resaltado en la fig. 3.9 consiste en generar una matriz principal a partir de los datos introducidos por el usuario, para luego reducirla y calcular el sistema de ecuaciones del cual se obtienen las presiones a través del método de Doolittle, explicado en el Capítulo II. La fig. 3.10 muestra el algoritmo de resolución de la matriz.

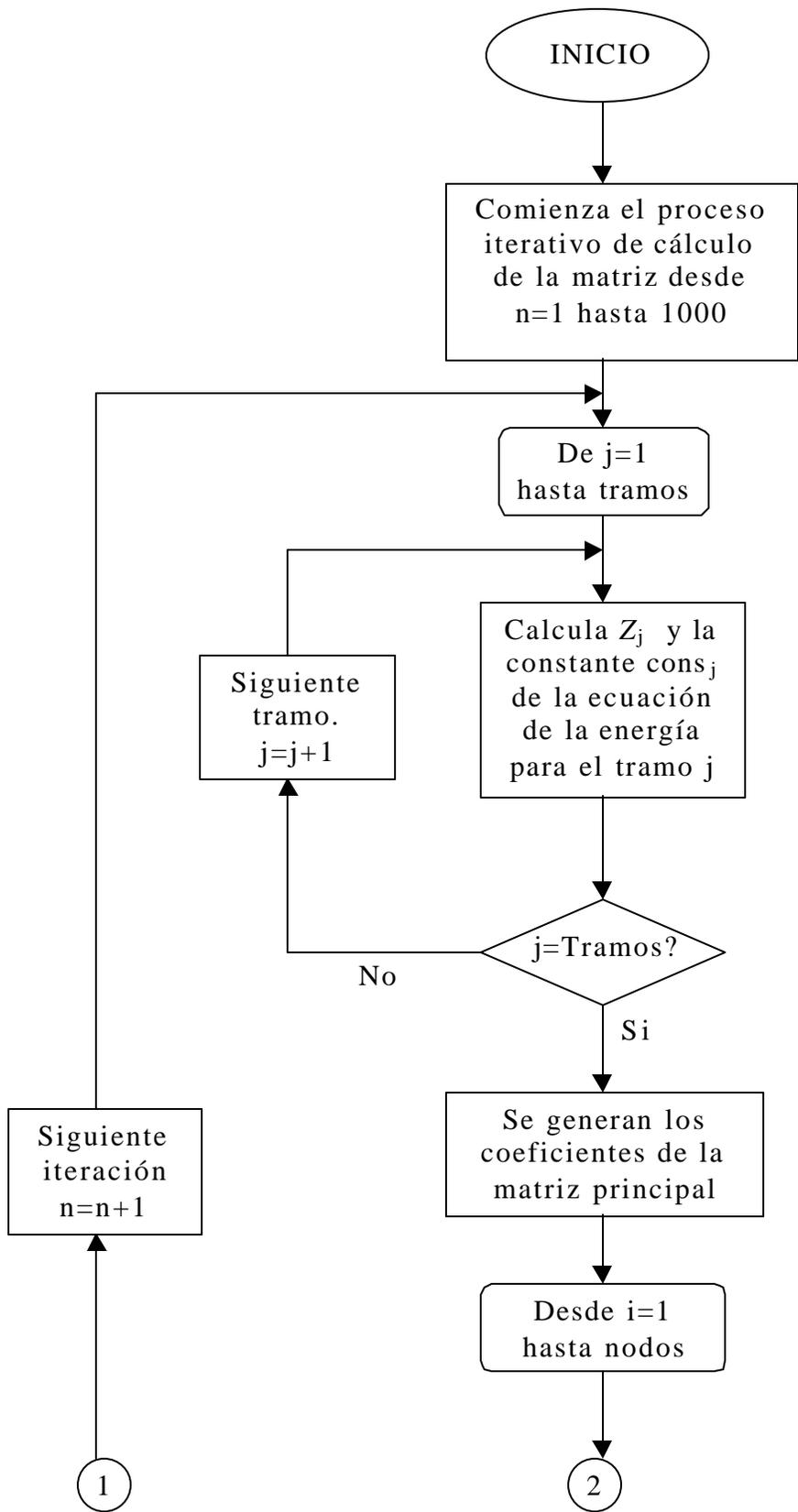


Fig. 3.10 Algoritmo de resolución del sistema de ecuaciones

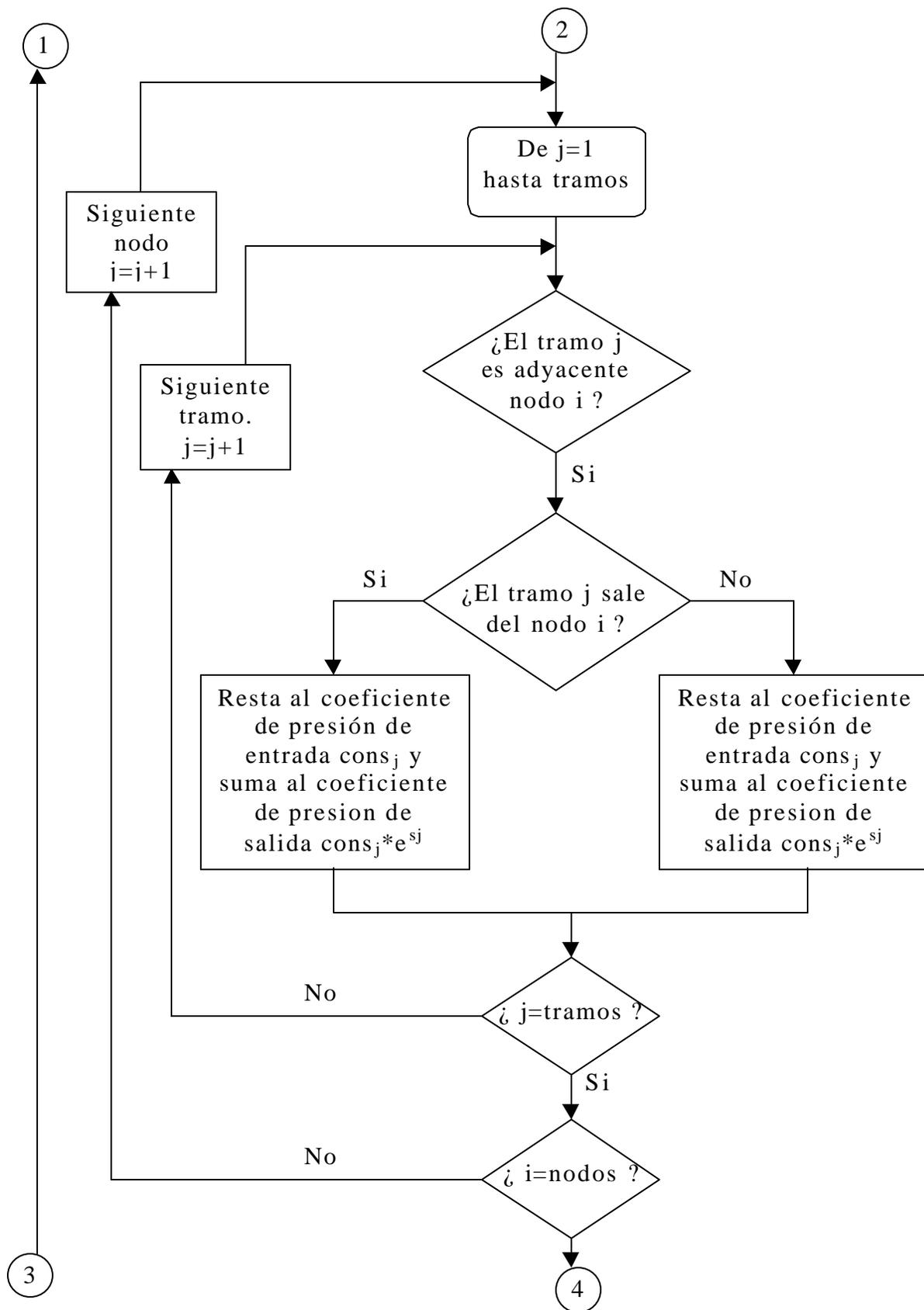


Fig. 3.10 (continuación) Algoritmo de resolución del sistema de ecuaciones

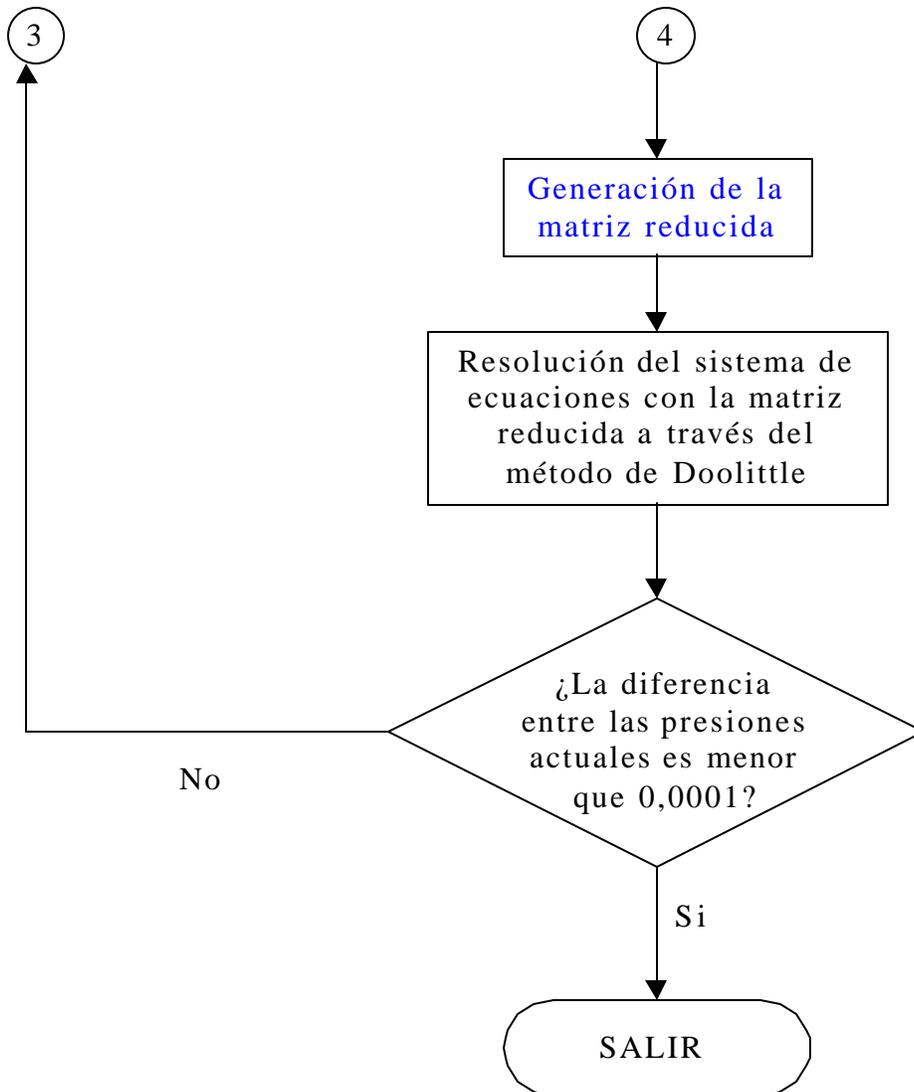


Fig. 3.10 (continuación) Algoritmo de resolución del sistema de ecuaciones

El algoritmo de formación de la matriz reducida se puede apreciar en la fig. 3.11

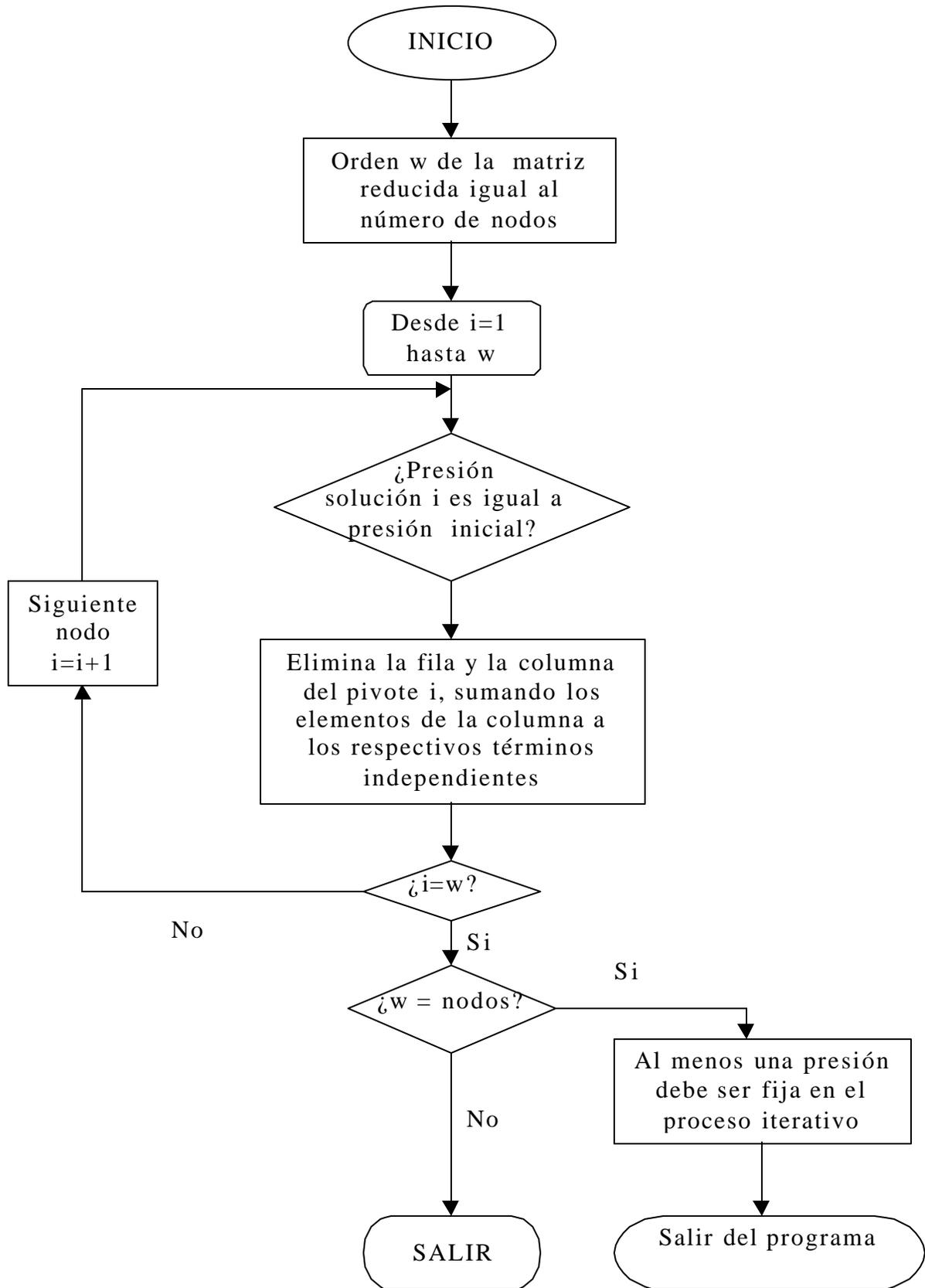
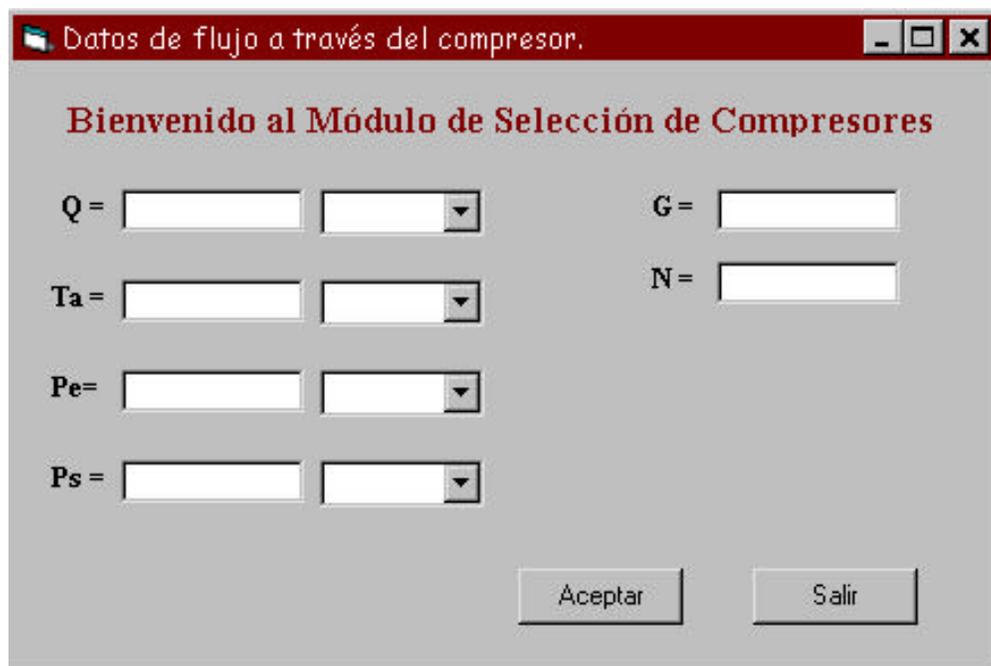


Fig. 3.11 Algoritmo de formación de la matriz reducida.

MODULO DE SELECCIÓN DE COMPRESORES:

Este módulo tiene como finalidad calcular la potencia isentrópica de compresores en kW y Hp, dependiendo de las presiones de entrada y salida del gas, del caudal, de la temperatura inicial y gravedad específica del mismo, así como también del número de etapas tentativo de una posible unidad compresora. La fig. muestra el formulario asociado a la introducción de datos del compresor:



The image shows a software window titled "Datos de flujo a través del compresor." with a red title bar. Inside the window, the text "Bienvenido al Módulo de Selección de Compresores" is displayed in red. Below this, there are input fields for various parameters: Q=, G=, Ta=, N=, Pe=, and Ps=. Each parameter name is followed by a text input box and a dropdown menu. At the bottom of the window, there are two buttons: "Aceptar" and "Salir".

Fig 3.12. Formulario de datos. Compresor

Adicionalmente, dependiendo de las condiciones de entrada y salida, y del caudal de gas, se recomiendan posibles unidades compresoras que operen típicamente en estas condiciones.

La fig. 3.13 muestra el algoritmo de selección de compresores.

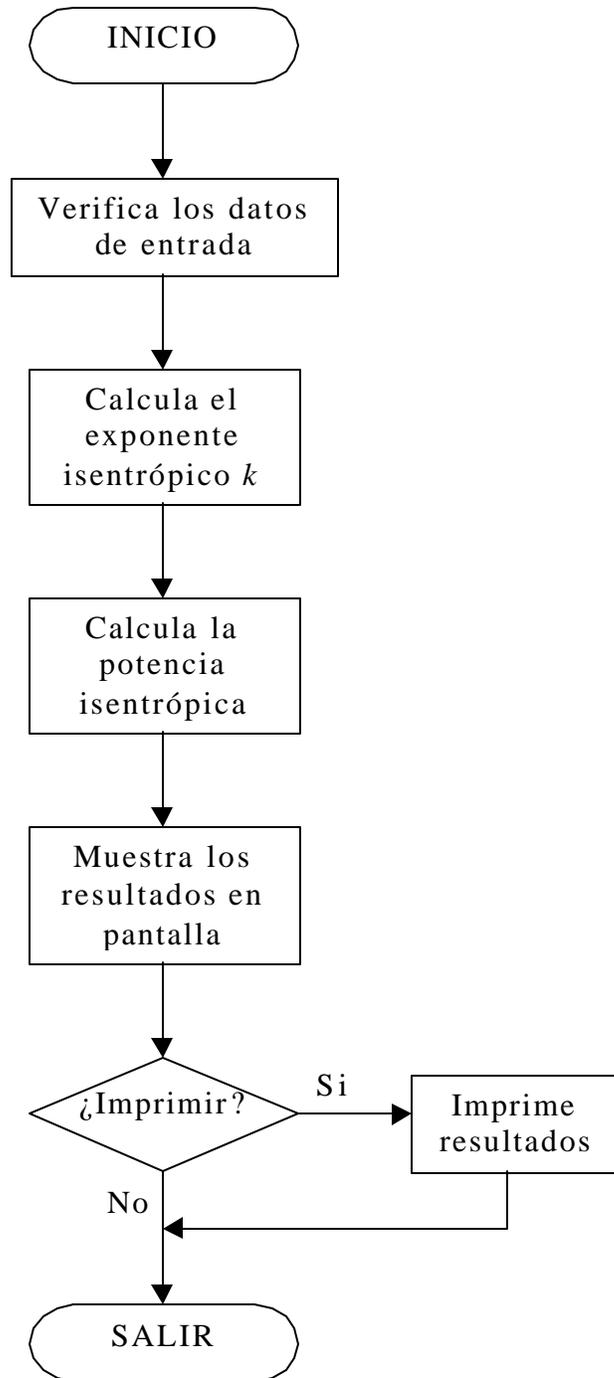


Fig. 3.13 Algoritmo de cálculo de compresores.

El algoritmo computacional del programa de Análisis de Fluidos Compresibles es presentado en el **Anexo C**.

CAPITULO IV

VALIDACION DE RESULTADOS

GENERALIDADES:

En este capítulo, se verifica la posibilidad de utilizar el programa diseñado basándose en la veracidad de sus resultados, a través comparaciones entre el programa y simuladores comerciales, así como también, con proyectos realizados por la Empresa NOUEL Ingenieros Consultores C.A., para definir si los resultados arrojados por el mismo, son legítimos, con lo cual se define la posibilidad de su implementación en la Empresa.

VALIDACION DEL MODULO LONGITUD EQUIVALENTE:

La validación de este módulo se realizó a partir del proyecto Nro. 956 de NOUEL Ingenieros Consultores C.A.: “Laboratorio Integrado de Campo EL Furrial” realizado para la Empresa PDVSA. Los planos de vista de planta de este proyecto están incluidos en el **Anexo D**.

Para esta validación se seleccionaron los 5 tramos de tubería estudiados en el proyecto antes mencionado. Para calcular la longitud equivalente, se conocen los siguientes datos para cada tramo:

Tramo 1:

Diámetro nominal $D_n = 12''$

Diámetro interno $D_{int} = 7,65''$

Longitud del tramo recto de tubería $L = 800$ m

Accesorios:

- 2 codos de 90^0 $D = 12''$ Long. de pérdidas $L_{perd} = 25$ pies (Ver tabla A-2del **Anexo A**)
- 1 codo de 45^0 $D = 12''$ Long. de pérdidas $L_{perd} = 12$ pies (Ver tabla A-2del **Anexo A**)

- 1 Válvula de compuerta $D = 12''$ Long. de pérdidas $L_{\text{perd}} = 11$ pies (Ver tabla A-2 del **Anexo A**)

Tramo2

Diámetro nominal $D_n = 6''$

Diámetro interno $D_{\text{int}} = 3,885''$

Longitud del tramo recto de tubería $L = 20$ m

Accesorios:

- 1 Válvula de globo $D = 6''$ Long. de pérdidas $L_{\text{perd}} = 200$ pies (Ver tabla A-2 del **Anexo A**)
- 1 Válvula de compuerta $D = 6''$ Long. de pérdidas $L_{\text{perd}} = 5,5$ pies (Ver tabla A-2 del **Anexo A**)

Tramo3

Diámetro nominal $D_n = 12''$

Diámetro interno $D_{\text{int}} = 7,65''$

Longitud del tramo recto de tubería $L = 100$ m

Accesorios:

- 4 codos de 45^0 $D = 12''$ Long. de pérdidas $L_{\text{perd}} = 12$ pies (Ver tabla A-2 del **Anexo A**)

Tramo4

Diámetro nominal $D_n = 6''$

Diámetro interno $D_{\text{int}} = 3,885''$

Longitud del tramo recto de tubería $L = 10$ m

Accesorios:

- 2 Válvulas de compuerta $D = 6''$ Long. de pérdidas $L_{\text{perd}} = 5,5$ pies (Ver tabla A-2 del **Anexo A**)

Tramo5

Diámetro nominal $D_n = 8''$

Diámetro interno $D_{\text{int}} = 3,885''$

Longitud del tramo recto de tubería $L = 18$ m

Accesorios:

- 2 Te de línea de flujo $D = 8''$ Long. de pérdidas $L_{\text{perd.}} = 11$ pies. (Ver tabla A-2 del **Anexo A**.)

Los resultados obtenidos para cada tramo a través del programa AFC se pueden observar en las figuras 4.1 a la 4.5. Los resultados obtenidos por La Empresa NOUEL INGENIEROS CONSULTORES C.A., se presentan en la figura 4.6. La exactitud en los resultados se debe a que la Empresa se basa en La tabla A-2 del **Anexo A** para realizar sus cálculos de diseño.

Fig. 4.1 Resultados obtenidos de Longitud equivalente para el tramo Nro. 1.

Fig. 4.2. Resultados obtenidos de Longitud equivalente para el tramo Nro. 2.

Fig. 4.3. Resultados obtenidos de Longitud equivalente para el tramo Nro. 3.

Fig. 4.4 Resultados obtenidos de Longitud equivalente para el tramo Nro. 4.

Fig. 4.5. Resultados obtenidos de Longitud equivalente para el tramo Nro. 5.

Fig. 4.6. Longitud equivalente para los tramos

VALIDACION DEL MODULO REDES DE TUBERIAS:

Para la validación de este módulo, se seleccionaron tres casos básicos:

- Red abierta.
- Red cerrada.
- Red Real.

El programa obtenido a partir de este trabajo especial, fue comparado con un simulador comercial conocido como PIPEPHASE 7.3., cuya licencia pertenece a la Empresa NOUEL INGENIEROS CONSULTORES C.A., y adicionalmente se incluyen los valores obtenidos de una red real perteneciente al proyecto 986 de la misma Empresa, y que lleva el nombre de “Ingeniería Conceptual del Proyecto de Recolección de gas a baja presión en BARE-Arecuna”, cuyo plano se incluye en el **Anexo D**, el cual permitió comparar los resultados obtenidos a través de los dos programas. Para todas las validaciones, se seleccionó el sistema inglés como sistema de unidades, por ser este, el predominante en la industria petrolera mundial.

Para todos los casos, se consideró gas de gravedad específica $G = 0,6$ siendo las condiciones ambientales de temperatura $T_a = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y de presión $P_a = 101.325 \text{ kPa}$, el cual fluye con una temperatura $T_f = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

VALIDACION DE UNA RED ABIERTA:

La fig. 4.7 muestra la distribución de los tramos de una red abierta, conformada por diez nodos y nueve tramos:

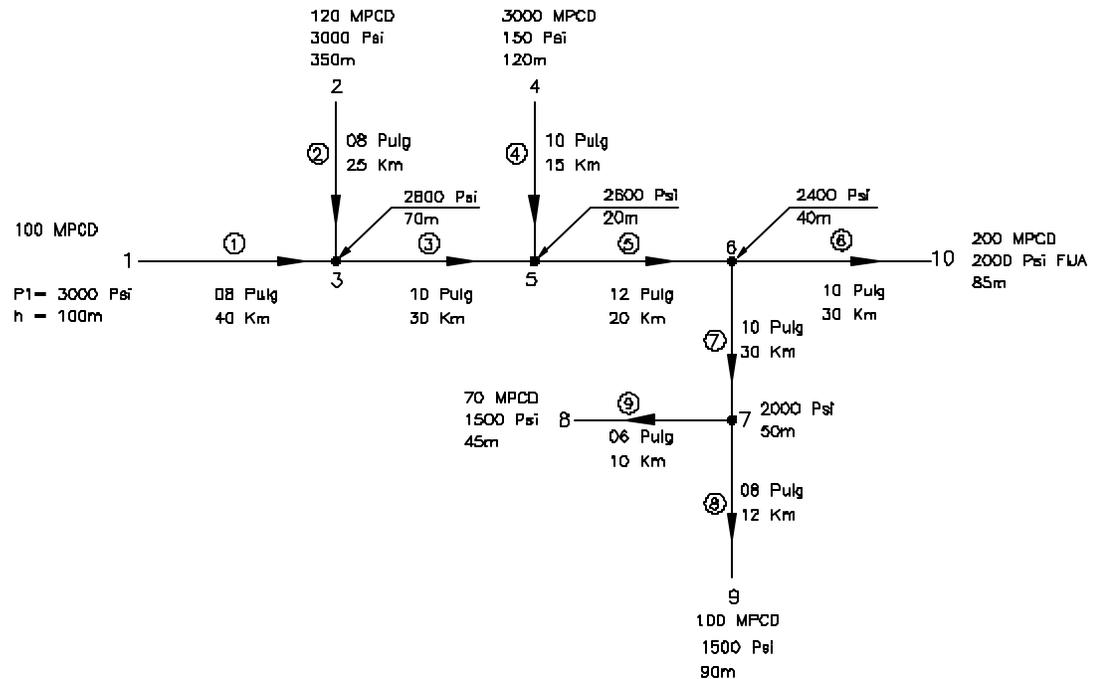


Fig. 4.7. Configuración de una red abierta.

Las figuras 4.8 y 4.9 muestran los datos introducidos por el usuario para los nodos, y las figuras 4.10 y 4.11 muestran los datos introducidos por el usuario para los tramos.

Luego de realizar la corrida del programa, se obtuvieron los resultados de los nodos, mostrados en las figuras 4.12 y 4.13, y de los tramos, mostrados en las figuras 4.14 y 4.15.

Fig. 4.8. Red abierta. Datos introducidos para los nodos SI

Fig. 4.9. Red abierta. Datos introducidos para los nodos Sist. Inglés.

Fig. 4.10. Red abierta. Datos Introducidos para los tramos. SI

Fig. 4.11. Red abierta. Datos introducidos para los tramos Sist. Inglés

Fig. 4.12. Red abierta. Resultados obtenidos de los nodos SI

Fig. 4.13. Red abierta. Resultados obtenidos de los nodos Sist. Inglés

Fig. 4.14. Red abierta. Resultados obtenidos de los tramos SI.

Al comparar los resultados obtenidos en los nodos, con los resultados para los nodos de una corrida realizada con el Simulador comercial, cuyos resultados son presentados en la parte 1 del **Anexo E**, se pudo apreciar que el máximo error obtenido para las presiones fue de 5,29 % y se presenta en el nodo 7. En el caso de los tramos, se pudo apreciar que, a nivel general, el error obtenido para los caudales fue prácticamente nulo (0,0002 % el error máximo en los tramos 1, 4, 7 y 9).

Estos resultados demuestran que para el caso de redes de tuberías abiertas, el programa converge adecuadamente a una solución.

VALIDACION DE UNA RED CERRADA:

La fig. 4.12 muestra la distribución de una red cerrada conformada por ocho nodos y once tramos:

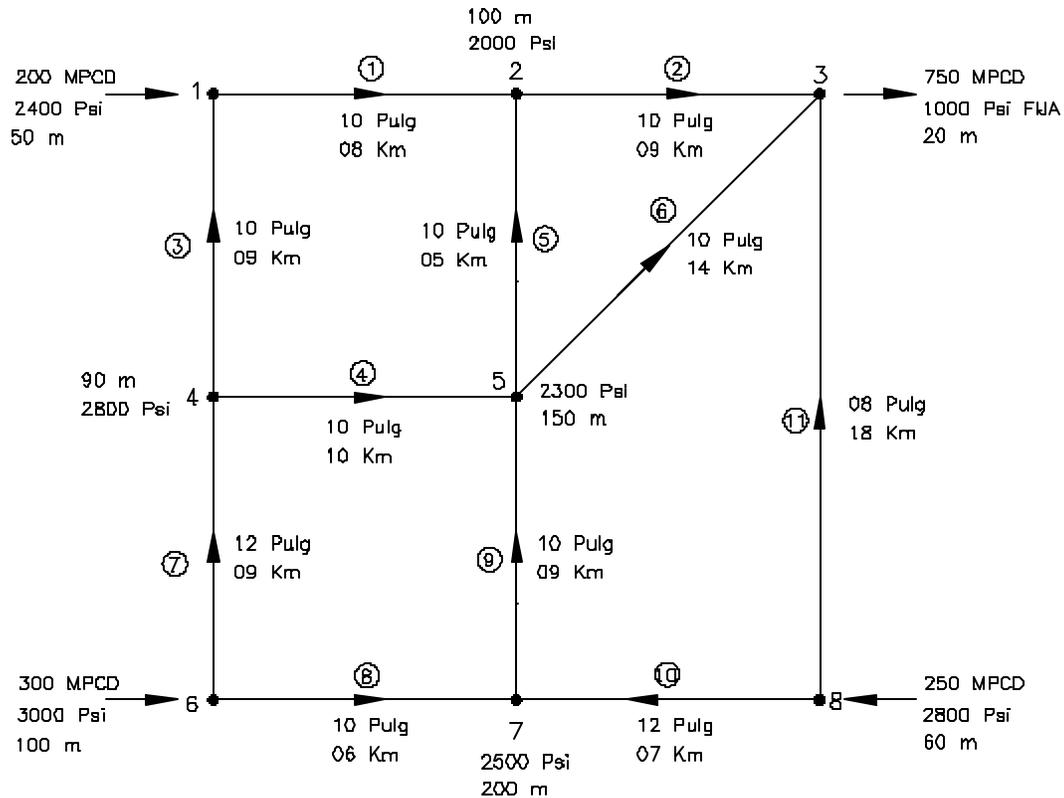


Fig. 4.16. Configuración de una red cerrada.

Las fig. 4.17 y 4.18 muestran los datos introducidos por el usuario para los nodos, y las fig. 4.19 y 4.20 muestran los datos introducidos por el usuario para los tramos.

Luego de realizar la corrida del programa, se obtuvieron los resultados de los nodos, mostrados en las figuras 4.21 y 4.22, y de los tramos, mostrados en las figuras 4.23 y 4.24.

Fig. 4.17. Red cerrada. Datos introducidos para los nodos SI

Fig. 4.18. Red cerrada. Datos introducidos para los nodos Sist. Inglés.

Fig. 4.19. Red cerrada. Datos Introducidos para los tramos. SI

Fig. 4.20. Red cerrada. Datos introducidos para los tramos Sist. Inglés

Fig. 4.21. Red cerrada. Resultados obtenidos de los nodos SI

Fig. 4.22. Red cerrada. Resultados obtenidos de los nodos Sist. Inglés

Fig. 4.23. Red cerrada. Resultados obtenidos de los tramos SI.

Al comparar los resultados obtenidos en los nodos, con los resultados para los nodos de una corrida realizada con el Simulador comercial, cuyos resultados son presentados en la parte 2 del **Anexo E**, se pudo apreciar que el máximo error obtenido para las presiones fue de 7,29 % y se presenta en el nodo número 7. En el caso de los tramos, se pudo apreciar que el error máximo es de 7,12 % y se presenta en el tramo número 3. Si se considera que estos errores no son muy significativos, se puede decir que el programa converge adecuadamente a una solución.

VALIDACION DE UNA RED REAL:

La fig. 4.25 muestra la distribución de una red abierta existente conformada por quince nodos y catorce tramos ubicada en el campo "" perteneciente a la empresa PDVSA.:

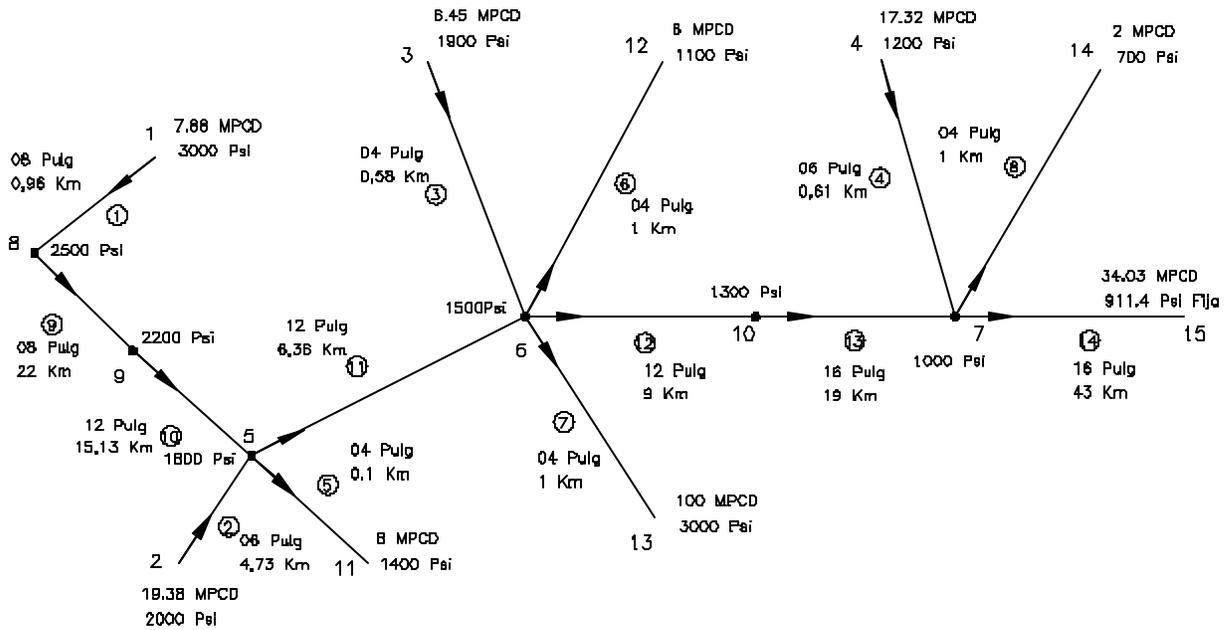


Fig. 4.25. Configuración de la red

Las figuras 4.26 y 4.27 muestran los datos introducidos por el usuario para los nodos, y las figuras 4.28 y 4.29 muestran los datos introducidos por el usuario para los tramos.

Luego de realizar la corrida del programa, se obtuvieron los resultados de los nodos, mostrados en las figuras 4.30 y 4.31, y de los tramos, mostrados en las figuras 4.32 y 4.33.

Fig. 4.26. Red real. Datos introducidos para los nodos SI

Fig. 4.27. Red real. Datos introducidos para los nodos Sist. Inglés

Fig. 4.28. Red real. Datos Introducidos para los tramos. SI

Fig. 4.29. Red real. Datos introducidos para los tramos Sist. Inglés

Fig. 4.30. Red real. Resultados obtenidos de los nodos SI

Fig. 4.31. Red real. Resultados obtenidos de los nodos Sist. Inglés

Fig. 4.32. Red real. Resultados obtenidos de los tramos SI.

Al comparar los resultados obtenidos en los nodos, con los resultados para los nodos de una corrida realizada con el Simulador comercial, cuyos resultados son presentados en la parte 3 del **Anexo E**, se pudo apreciar que el máximo error obtenido para las presiones fue de 1 % y se presenta en el nodo número 2. En el caso de los tramos, se pudo apreciar que el error máximo es de 0,11 % y se presenta en el tramo número 4. Estos resultados permiten indicar que el programa converge a una solución correcta.

Comparando ahora, los resultados obtenidos, con los verdaderos datos presentes en la red, se observó un error máximo para las presiones de 4,62 % en el nodo 2. En el caso de los tramos, se pudo apreciar que el máximo error fue de 0,11 %, y se obtuvo en el tramo número 4. Los datos de operación de esta red se pueden ver en la parte 4 del **Anexo E**.

VALIDACION DEL MODULO TUBERIAS:

Para validar este módulo, se utilizó el tramo número catorce de la red real de tuberías descrita en la fig. 4.17, ya que en este tramo se presenta una presión que es fija, además de que el ejemplo representa un tramo real de tubería.

De los datos de los tramos la red existente (fig. 4.19) se tiene:

$$Q = 14.0896 m^3/s = 34.032 MMPCD$$

$$D_{int} = 0,4064 m = 16 \text{ pulg}$$

$$L_{eq} = 43000 m = 141100 \text{ pie} = 43 km = 26,72 mi$$

$$T_a = 25^{\circ} C$$

$$T_f = 25^{\circ} C$$

$$P_a = 101,325 kPa = 14,73 psi$$

$$G = 0,6$$

$$z_e = z_s = 0$$

Se tiene como dato adicional, la presión a la descarga que es $P_2 = 6283.9207$ kPa. La fig.4.33 muestra los resultados de la corrida del módulo de tuberías. De los resultados obtenidos por el módulo tuberías, al comparar la presión de entrada calculada ($P_1=6324.1205$ kPa) con la presión de entrada calculada a través del módulo de redes de tuberías correspondiente al nodo siete ($P_7=6324.9001$ kPa), se observó un error de 0,03%, y al compararlo con el resultado para el mismo nodo en el simulador comercial ($P_7=6330,8$), se obtuvo un error de 0,08%. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.34.

VALIDACION DEL MODULO COMPRESORES:

Para validar este módulo se seleccionó un compresor que cumple con las siguientes características:

Caudal de operación $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$

Presión de entrada a la unidad $P_1 = 101,5862 \text{ kPa}$

Presión de descarga de la unidad $P_2 = 5517,2414 \text{ kPa}$

Temperatura ambiental $T_a = 298,15 \text{ K} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Gravedad específica del gas $G = 0,6$

Número de etapas del compresor $ne = 2$

Los resultados obtenidos pueden observarse en la figura 4.35. Al comparar los resultados obtenidos con la fig. A.3 del **Anexo A** se observa que se cumple el rango de trabajo estimado, por lo cual este módulo es aplicable para la selección de compresores.

Fig. 4.35. Módulo de selección de compresores .

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

De los análisis de resultados del Capítulo V realizados al programa AFC, se determinó que:

El módulo de Longitud Equivalente, satisface la Norma PDVSA Nro. L-TP 1.5 en lo referente a las pérdidas por accesorios, por lo cual, su uso es adecuado en aplicaciones de ingeniería.

El módulo de cálculo de tuberías, satisface la norma antes mencionada, haciendo de este módulo, una herramienta de gran utilidad, ya que reduce notablemente el tiempo de cálculo, además de que solicita al usuario la mínima cantidad de datos posible, pero cumpliendo también con los requisitos de la Norma PDVSA Nro. 90616.1.024, por lo cual es adecuado su uso en aplicaciones de ingeniería.

El módulo de cálculo de redes de tuberías, ofrece resultados satisfactorios a nivel de la comparación realizada con el simulador comercial, y aunque los errores al comparar los resultados obtenidos con la red real son elevados, se puede decir que son igualmente satisfactorios, ya que la gran cantidad de factores que influyen en el fluido cuando es transportado, no pueden ser exactamente reproducidos por el programa, pero se obtiene un resultado aproximado razonable, que a la hora de realizar un diseño, influye definitivamente sobre los resultados finales. Además, el simulador comercial presenta un error igualmente elevado, por lo cual se puede decir que el error no está en el algoritmo de cálculo, sino en la disposición de funcionamiento de la red real que tal vez no sea la más eficiente. En general, los resultados

obtenidos del análisis de resultados para redes de tuberías, satisfacen los requerimientos de diseño de las mismas, por lo cual este módulo es una herramienta de cálculo económicamente rentable, desde el punto de vista del análisis de fluidos compresibles en redes de tuberías.

El módulo de cálculo de compresores, permite obtener un valor aproximado de la potencia, recordando siempre que el valor calculado es el de la potencia en base adiabática, por lo cual es necesario dividir este valor entre la eficiencia total de la unidad compresora disponible, para estimar la potencia definitiva que debe tener el equipo. Este módulo puede considerarse como una herramienta efectiva para la selección del tipo de compresor adaptado a las condiciones de operación sobre el fluido.

Por otra parte, en vista de los resultados obtenidos para todos los módulos, se puede decir que las correlaciones para cálculo computacional de viscosidad, factor de compresibilidad y calor específico, utilizadas a lo largo de este trabajo especial, son satisfactorias, validando nuevamente, los trabajos realizados por todos los autores involucrados.

Finalmente a nivel general, se puede decir que el programa para el análisis de fluidos compresibles, además de satisfacer los requerimientos teóricos para el estudio de fluidos, también satisface los requerimientos técnicos basados en la experiencia de la industria petrolera nacional, lo que convierte a este programa, en una de las primeras aplicaciones computacionales de este tipo, enfocada a las necesidades industriales internas.

RECOMENDACIONES

Para aumentar el rango de acción de este programa, se recomienda implementar la posibilidad de analizar flujos bifásicos así como también, flujos composicionales, lo que requeriría de trabajos futuros.

Implementar la teoría de flujo isotérmico y de redes de tuberías de fluidos compresibles en alguna materia electiva relacionada con estos temas, ya que la industria nacional marcha en esa dirección, y la teoría que involucra el análisis de transporte de fluidos compresibles puede ser de gran interés y utilidad para los estudiantes interesados en este tipo de materias.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- MARKS. "Manual del Ingeniero Mecánico". México. Editorial Mc.Graw Hill. 1995. Vol I y II
- 2.- CHANG, Raymond. "Química". México. Editorial Prentice Hall. 1998.
- 3.- KUMAR, Sanjay. "Gas Production Engineering". Houston. Gulf Publishing Company. 1987.
- 4.- GOPAL , V. N., "Gas Z-Factor Equations Developed for Computer". Oil and Gas Journal. Vol. 75. Nro. 32 (agosto). 1977. Pag. 58-60.
- 5.- VAN WYLEN, Gordon. "Fundamentals of Classical Thermodynamics". New York. Ed. John Wiley and Sons. 1994
- 6.- "Engineering Data Book". Gas Processors Suppliers Association. Tulsa. 1987.
- 7.- LEE, A.L., González, M.H. "The Viscosity of Natural Gases". Journal of Petroleum Technology. 1966. Vol. 18 . Nro. 8 . Pag. 997.
- 8.- POTTER, Merle. "Mecánica de Fluidos". México. Editorial Prentice Hall. 1998.

- 9.- CRANE. "Flujo de Fluidos en Válvulas, accesorios y tuberías". México. Editorial Mc. Graw Hill. 1989. pag. 1.1-2.20.
- 10.- MARKS, Alex. "Handbook of Pipeline Computations". Tulsa. Petroleum Publishing Company. 1979.
- 11.- KATZ, Donald. "Handbook of Natural Gas Engineering". New York. Editorial Mc. Graw Hill. 1959.
- 12.- OSIADACZ, A. J. "Simulation and Analysis of Gas Networks". London. Gulf Publishing Company. 1997.
- 13.- "Pipeline Design for Hydrocarbon Gases and Liquids". New York. American Society of Civil Engineers. 1975. Pag. 1-16.
- 14.- PDVSA Nro. 90616.1.024. "Dimensionamiento de Tuberías de Proceso". Manual de Ingeniería de diseño, Vol. 13-III, Guía de Ingeniería 1993.
- 15.- Revista Técnica Sulzer. Nro. 1 / 2 1988. Sulzer Frères Societé Anonyme.
- 16.- PDVSA Nro. L-TP 1.5. "Cálculo Hidráulico de Tuberías ". Manual de Ingeniería de diseño, Vol. 13-III, Procedimiento de Ingeniería 1994.

17.- BURDEN, Richard. "Análisis Numérico". México. Grupo Editorial Iberoamérica.
1985.

ANEXO “A”
CORRELACIONES

TABLA A-1

Correlaciones de Gopal para la carta de Standing y Katz

Rango de Presión Reducida	Rango de Temperatura Reducida	ECUACION	Nro. Ecuación
0,2 - 1,2	1,05 - 1,2	$P_r(1,6643T_r - 2,114) - 0,3647T_r + 1,4385$	1
	1,2 - 1,4	$P_r(0,5222T_r - 0,8511) - 0,0364T_r + 1,0490$	2
	1,4 - 2	$P_r(0,1391T_r - 0,2988) - 0,0007T_r + 0,9967$	3
	2 - 3	$P_r(0,0295T_r - 0,0825) + 0,0009T_r + 0,9967$	4
1,2 - 2,8	1,05 - 1,2	$P_r(-1,3570T_r + 1,4942) + 4,6315T_r - 4,7009$	5
	1,2 - 1,4	$P_r(0,1717T_r - 0,3232) + 0,5869T_r + 0,1229$	6
	1,4 - 2	$P_r(0,0984T_r - 0,2053) + 0,0621T_r + 0,8580$	7
	2 - 3	$P_r(0,0211T_r - 0,0527) + 0,0127T_r + 0,9549$	8
2,8 - 5,4	1,05 - 1,2	$P_r(-0,3278T_r + 0,4752) + 1,8223T_r - 1,9036$	9
	1,2 - 1,4	$P_r(-0,2521T_r + 0,3871) + 1,6087T_r - 1,6635$	10
	1,4 - 2	$P_r(-0,0284T_r + 0,0625) + 0,4714T_r - 0,0011$	11
	2 - 3	$P_r(0,0041T_r + 0,0039) + 0,0607T_r + 0,7927$	12
$P_r > 5,4$	1,05 - 3	$P_r(0,711 + 3,66T_r)^{-1,4667} - 1,637/(0,319T_r + 0,522) + 2,071$	13

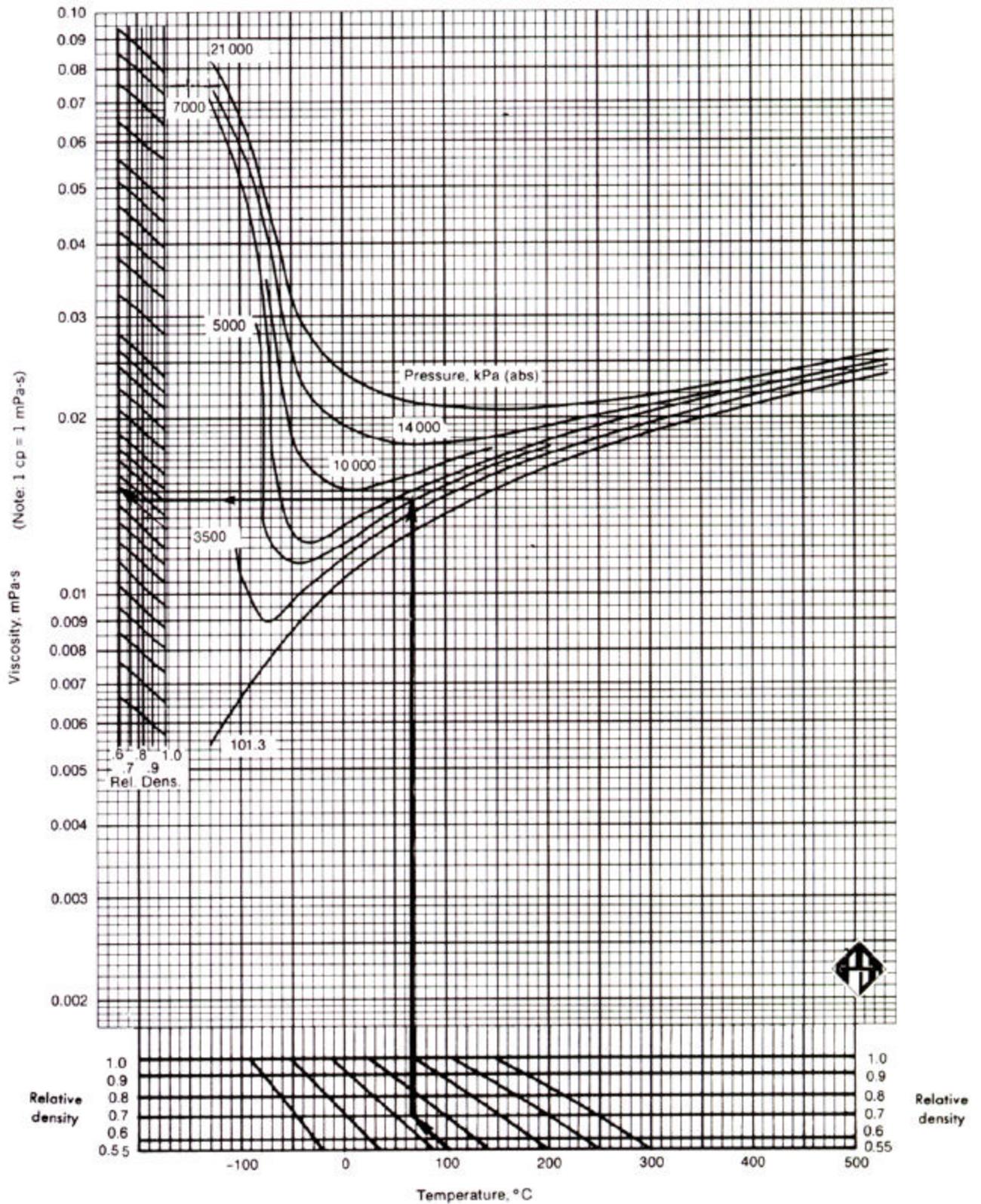


Fig. A.1 Viscosidad como función de la Presión reducida, temperatura reducida y gravedad específica. Cortesía de Gas Processors Suppliers Association.

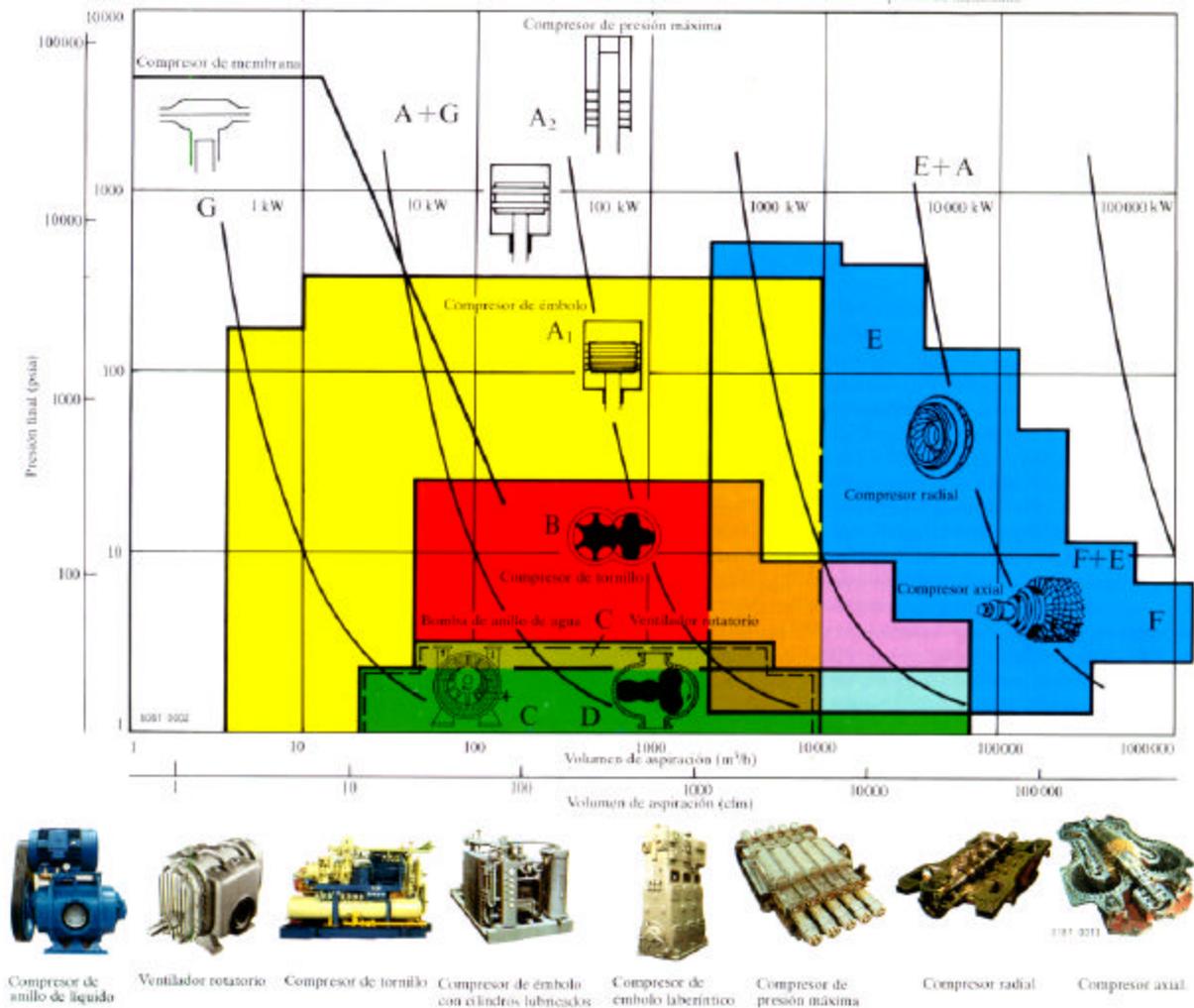


Fig. A.2. Tipos de compresores seleccionados para las diferentes condiciones de operación. Cortesía de la Revista Sulzer.

ANEXO B

**ALGORITMO DE RESOLUCION DE MATRICES POR EL
METODO DE DOOLITTLE**

METODO DE DOOLITTLE DE RESOLUCION DE MATRICES

Para factorizar una matriz $A_{n \times n}$ en una matriz triangular inferior L multiplicada por una matriz triangular superior U , esto es $A=LU$ donde se consideran todos los elementos de la diagonal principal de L iguales a 1.

Los datos de entrada son:

- La dimensión n de la matriz principal.
- Los elementos a_{ij} de la matriz principal.

El elemento $u_{11} = a_{11}$.

Desde $j = 2$ hasta n se considera:

$$u_{1j} = \frac{a_{1j}}{l_{11}} \quad \text{Primera fila de } U$$

$$l_{j1} = \frac{a_{j1}}{u_{11}} \quad \text{Primera columna de } L$$

Desde $j = i + 1$ hasta n se considera:

$$u_{ij} = a_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} u_{kj} \quad \text{i-esima fila de } U$$

$$l_{ji} = \frac{1}{u_{ii}} \left[a_{ji} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{jk} u_{ki} \right] \quad \text{i-esima columna de } L$$

obtenidos todos los valores l_{ii} y u_{ii} se procede a resolver el sistema de ecuaciones:

Se considera:

$$z_1 = \frac{a_{1,n+1}}{l_{11}}$$

Desde $i = 2$ hasta n se considera:

$$z_i = a_{i,n+1} - \sum_{j=1}^{i-1} l_{ij} z_j$$

ahora se considera:

$$x_n = \frac{z_n}{u_{nn}}$$

y finalmente, desde $i = n-1$ hasta 1 (sustitución hacia atrás):

$$x_i = \frac{1}{u_{ii}} \left[z_i - \sum_{j=i+1}^n u_{ij} x_j \right]$$

los valores x_i son el resultado obtenido del sistema de ecuaciones lineales calculado por el método de factorización directa de matrices de Doolittle.

ANEXO C

CODIGO DEL PROGRAMA

CODIGO DEL MODULO LONGITUD

```
Private Sub combo1_click()  
Select Case Combo1.ListIndex  
Case 0  
A1 = 2  
A2 = 1.6  
A3 = 0.86  
A4 = 1.7  
A5 = 5.2  
A6 = 3.4  
A7 = 35  
A8 = 1  
A9 = 12  
A10 = 18  
A11 = 0.16  
A12 = 2  
A13 = 3.1  
A14 = 4  
LD1 = 1  
Case 1  
A1 = 4.1  
A2 = 3.1  
A3 = 2  
A4 = 2.8  
A5 = 10  
A6 = 6.9  
A7 = 70  
A8 = 2  
A9 = 23  
A10 = 35  
A11 = 0.36  
A12 = 4.5  
A13 = 7  
A14 = 9  
LD1 = 2  
Case 2  
A1 = 6.1  
A2 = 4.6  
A3 = 2.8  
A4 = 3.9  
A5 = 15  
A6 = 10  
A7 = 105  
A8 = 2.7  
A9 = 35  
A10 = 50  
A11 = 0.59  
A12 = 7.4  
A13 = 12  
A14 = 15  
LD1 = 3  
Case 3  
A1 = 8.1  
A2 = 5.8  
A3 = 3.7  
A4 = 5.5  
A5 = 20  
A6 = 14  
A7 = 135  
A8 = 3.5  
A9 = 45  
A10 = 67  
A11 = 0.82  
A12 = 10  
A13 = 16
```

A14 = 20
LD1 = 4

Case 4

A1 = 12
A2 = 8.6
A3 = 5.8
A4 = 8.4
A5 = 30
A6 = 21
A7 = 200
A8 = 5.5
A9 = 68
A10 = 100
A11 = 1.4
A12 = 18
A13 = 27
A14 = 36
LD1 = 6

Case 5

A1 = 16
A2 = 11
A3 = 7.9
A4 = 11
A5 = 40
A6 = 28
A7 = 270
A8 = 7.1
A9 = 90
A10 = 130
A11 = 1.9
A12 = 24
A13 = 37
A14 = 48
LD1 = 8

Case 6

A1 = 20
A2 = 14
A3 = 10
A4 = 14
A5 = 50
A6 = 33
A7 = 340
A8 = 8.8
A9 = 113
A10 = 170
A11 = 2.5
A12 = 31
A13 = 49
A14 = 62
LD1 = 10

Case 7

A1 = 25
A2 = 16
A3 = 12
A4 = 17
A5 = 60
A6 = 42
A7 = 400
A8 = 11
A9 = 135
A10 = 200
A11 = 3.1
A12 = 39
A13 = 60
A14 = 78
LD1 = 12

Case 8

A1 = 27
A2 = 18

A3 = 13
A4 = 18
A5 = 66
A6 = 46
A7 = 450
A8 = 12
A9 = 149
A10 = 220
A11 = 3.5
A12 = 44
A13 = 68
A14 = 88
LD1 = 14

Case 9

A1 = 31
A2 = 20
A3 = 16
A4 = 21
A5 = 76
A6 = 53
A7 = 525
A8 = 13
A9 = 172
A10 = 250
A11 = 4.2
A12 = 53
A13 = 82
A14 = 106
LD1 = 16

Case 10

A1 = 35
A2 = 22
A3 = 18
A4 = 24
A5 = 86
A6 = 60
A7 = 590
A8 = 15
A9 = 194
A10 = 290
A11 = 4.8
A12 = 60
A13 = 94
A14 = 120
LD1 = 18

Case 11

A1 = 39
A2 = 25
A3 = 20
A4 = 26
A5 = 96
A6 = 67
A7 = 655
A8 = 17
A9 = 217
A10 = 320
A11 = 5.4
A12 = 68
A13 = 105
A14 = 136
LD1 = 20

Case 12

A1 = 47
A2 = 29
A3 = 24
A4 = 32
A5 = 116
A6 = 81
A7 = 800

```

    A8 = 20
    A9 = 262
    A10 = 390
    A11 = 6.9
    A12 = 86
    A13 = 135
    A14 = 172
    LD1 = 24
Case 13
    A1 = 57
    A2 = 36
    A3 = 31
    A4 = 39
    A5 = 146
    A6 = 102
    A7 = 950
    A8 = 25
    A9 = 329
    A10 = 490
    A11 = 9
    A12 = 113
    A13 = 175
    A14 = 226
    LD1 = 30
Case 14
    A1 = 71
    A2 = 43
    A3 = 37
    A4 = 48
    A5 = 176
    A6 = 117
    A7 = 1195
    A8 = 31
    A9 = 397
    A10 = 590
    A11 = 11
    A12 = 138
    A13 = 215
    A14 = 276
    LD1 = 36
Case 15
    A1 = 83
    A2 = 50
    A3 = 45
    A4 = 55
    A5 = 204
    A6 = 145
    A7 = 1395
    A8 = 36
    A9 = 464
    A10 = 690
    A11 = 14
    A12 = 175
    A13 = 273
    A14 = 350
    LD1 = 42
End Select
End Sub

Private Sub combo2_click()
    Select Case Combo2.ListIndex
    Case 0
        X1 = 3.2808
    Case 1
        X1 = 3280.8
    Case 2
        X1 = 1
    Case 3
        X1 = 5280
    
```

```
End Select
End Sub
```

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
LN1 = Val(Text2.Text)
LN2 = Val(Text3.Text)
LN3 = Val(Text4.Text)
LN4 = Val(Text5.Text)
LN5 = Val(Text6.Text)
LN6 = Val(Text7.Text)
LN7 = Val(Text8.Text)
LN8 = Val(Text9.Text)
LN9 = Val(Text10.Text)
LN10 = Val(Text11.Text)
```

```
L0 = X1 * Val(Text1.Text)
C1 = A1 * LN1
C2 = A2 * LN2
C3 = A3 * LN3
C4 = A4 * LN4
C5 = A5 * LN5
C6 = A6 * LN6
C7 = A7 * LN7
C8 = A8 * LN8
C9 = A9 * LN9
C10 = A10 * LN10
C11 = A11
C12 = A12
C13 = A13
C14 = A14
```

```
If Val(Text1.Text) < 0 Then
```

```
MsgBox "Introduzca un valor real positivo para la longitud", vbCritical, "Error al introducir longitud"
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If C1 < 0 Or C2 < 0 Or C3 < 0 Or C4 < 0 Or C5 < 0 Or C6 < 0 Or C7 < 0 Or C8 < 0 Or C9 < 0 Or C10 < 0 Then
```

```
MsgBox "introduzca un valor entero positivo para el número de accesorios", vbCritical, "Error al introducir número de accesorios"
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If X1 = 0 Then
```

```
MsgBox "Seleccione una unidad para la longitud", vbCritical, "Se requiere unidad de longitud"
Exit Sub
End If
```

```
If A1 = 0 Then
```

```
MsgBox "Seleccione un diámetro nominal de tubería", vbCritical, "Se requiere diámetro nominal"
Exit Sub
End If
```

```
If Option1.Value = True Then
```

```
h = C11
```

```
OP1 = 1
```

```
Elseif Option2.Value = True Then
```

```
h = C12
```

```
OP2 = 1
```

```
Elseif Option3.Value = True Then
```

```
h = C13
```

```
OP3 = 1
```

```
Else
```

```
h = 0
```

End If

If Check1.Value = 1 Then

w = C14

CH1 = 1

Else

w = 0

End If

$LL1 = L0 + C1 + C2 + C3 + C4 + C5 + C6 + C7 + C8 + C9 + C10 + h + w$

$LL2 = 0.3048 * LL1$

Load Forma10

Forma10.Label6 = LL1

Forma10.Label3 = LL2

Forma10.Show vbModal

End Sub

CODIGO DEL MODULO TUBERÍA

```
Private Sub combo1_click()  
    Select Case combo1.ListIndex  
        Case 0  
            K1 = 86400 'convierte m^3/s a m^3/día  
        Case 1  
            K1 = 24 'convierte m^3/h a m^3/día  
        Case 2  
            K1 = 1 'conserva el caudal en m^3/día  
        Case 3  
            K1 = 2446.58 'convierte pie^3/s a m^3/día  
        Case 4  
            K1 = 0.6796 'convierte pie^3/h a m^3/día  
        Case 5  
            K1 = 0.02832 'convierte pie^3/día a m^3/día  
    End Select  
End Sub  
Private Sub combo2_click()  
    Select Case Combo2.ListIndex  
        Case 0  
            K2 = 0.0101972 'convierte Kpa a kgf/cm^2  
        Case 1  
            K2 = 10.1972 'convierte Mpa a kgf/cm^2  
        Case 2  
            K2 = 1 'conserva la presión en kgf/cm^2  
        Case 3  
            K2 = 0.07031 'convierte psi a kgf/cm^2  
    End Select  
End Sub  
Private Sub combo3_click()  
    Select Case Combo3.ListIndex  
        Case 0  
            K3 = 1 'conserva la temperatura en Kelvin  
        Case 1  
            K3 = 1 'convierte grados centigrados a Kelvin  
        Case 2  
            K3 = 0.5556 'convierte grados Rankine a Kelvin  
        Case 3  
            K3 = 0.5556 'convierte grados Farenheit a Kelvin  
    End Select  
End Sub  
Private Sub combo4_click()  
    Select Case Combo4.ListIndex  
        Case 0  
            K4 = 1 'conserva la temperatura en Kelvin  
        Case 1  
            K4 = 1 'convierte grados centigrados a Kelvin  
        Case 2  
            K4 = 0.5556 'convierte grados Rankine a Kelvin  
        Case 3  
            K4 = 0.5556 'convierte grados Farenheit a Kelvin  
    End Select  
End Sub  
Private Sub combo5_click()  
    Select Case Combo5.ListIndex  
        Case 0  
            K5 = 0.001 'convierte m a km  
        Case 1  
            K5 = 1 'conserva la longitud en km  
        Case 2  
            K5 = 0.0003048 'convierte pie a km  
        Case 3  
            K5 = 1.6093 'convierte millas a km  
    End Select  
End Sub
```

```

Private Sub combo6_click()
    Select Case Combo6.ListIndex
        Case 0
            K6 = 1 'conserva la altura en m
        Case 1
            K6 = 0.3048 'convierte pies a m
    End Select
End Sub
Private Sub combo7_click()
    Select Case Combo7.ListIndex
        Case 0
            K7 = 1 'conserva la altura en m
        Case 1
            K7 = 0.3048 'convierte pies a m
    End Select
End Sub
Private Sub combo8_click()
    Select Case Combo8.ListIndex
        Case 0
            K8 = 0.0101972 'convierte Kpa a kgf/cm^2
            K12 = 1 'conserva la presión en kPa
        Case 1
            K8 = 10.1972 'convierte Mpa a kgf/cm^2
            K12 = 1000 'convierte MPa a kPa
        Case 2
            K8 = 1 'conserva la presión en kgf/cm^2
            K12 = 98.0665 'convierte kgf/cm^2 a kPa
        Case 3
            K8 = 0.07031 'convierte psi a kgf/cm^2
            K12 = 6.8948 'convierte psi a kPa
    End Select
End Sub
Private Sub combo9_click()
    Select Case Combo9.ListIndex
        Case 0
            K9 = 0.0101972 'convierte Kpa a kgf/cm^2
            K11 = 1 'conserva la presión en kPa
        Case 1
            K9 = 10.1972 'convierte MPa a kgf/cm^2
            K11 = 1000 'convierte MPa a kPa
        Case 2
            K9 = 1 'conserva la presión en kgf/cm^2
            K11 = 98.0665 'convierte kgf/cm^2 a kPa
        Case 3
            K9 = 0.07031 'convierte psi a kgf/cm^2
            K11 = 6.8948 'convierte psi a kPa
    End Select
End Sub
Private Sub combo10_click()
    Select Case Combo10.ListIndex
        Case 0
            K10 = 1 'mantiene el diametro en mm
        Case 1
            K10 = 10 'convierte cm a mm
        Case 2
            K10 = 25.4 'convierte pulg a mm
    End Select
End Sub

Private Sub Command1_Click()

    TQ = K1 * Val(Text1.Text) 'Caudal
    TP0 = K2 * Val(Text2.Text) 'Presión estándar convertida a kgf/cm^2
    TT0 = K3 * Val(Text3.Text) 'Temperatura estándar convertida a K

```

```
TTf = K4 * Val(Text4.Text) 'Temperatura de flujo convertida a K
TI = K5 * Val(Text5.Text) 'Longitud de línea convertida a km
TG = Val(Text6.Text) 'Gravedad específica
Th1 = K6 * Val(Text7.Text) 'Cota de entrada a la línea convertida a m
Th2 = K7 * Val(Text8.Text) 'Cota de salida de la línea convertida a m
TP1 = K8 * Val(Text9.Text) 'Presión de entrada a la línea convertida a kgf/cm^2
TP2 = K9 * Val(Text10.Text) 'Presión de descarga de la línea convertida a kgf/cm^2
TD = K10 * Val(Text11.Text) 'Diámetro interno de la tubería convertido a mm
TP3 = K11 * Val(Text10.Text) 'presión de descarga convertida a kPa
TP4 = K12 * Val(Text9.Text) 'presión de entrada convertida a kPa
```

```
If Combo3.ListIndex = 1 Then
    TT0 = Val(Text3.Text) + 273.15
Elseif Combo3.ListIndex = 3 Then
    TT0 = 5 / 9 * Val(Text3.Text) + 255.37
End If
```

```
If Combo4.ListIndex = 1 Then
    TTf = Val(Text4.Text) + 273.15
Elseif Combo4.ListIndex = 3 Then
    TTf = 5 / 9 * Val(Text4.Text) + 255.37
End If
```

```
TTv = 1.8 * TTf
```

```
If Val(Text1.Text) <= 0 Then
```

```
    MsgBox "El caudal debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir caudal"
    Exit Sub
End If
```

```
If Val(Text2.Text) <= 0 Then
```

```
    MsgBox "La presión atmosférica debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir Presión Atmosférica"
    Exit Sub
End If
```

```
If Val(Text5.Text) <= 0 Then
```

```
    MsgBox "La longitud equivalente debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir Longitud"
    Exit Sub
End If
```

```
If TT0 <= 0 Then
```

```
    MsgBox "La temperatura absoluta ambiental debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir temperatura"
    Exit Sub
```

```
End If
```

```
If TTf <= 0 Then
```

```
    MsgBox "La temperatura absoluta de flujo debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir temperatura"
    Exit Sub
```

```
End If
```

```
If TG <= 0 Then
```

```
    MsgBox "La gravedad específica debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir Gravedad específica"
    Exit Sub
```

End If

If K1 = 0 Then

```
MsgBox "Seleccione una unidad para el caudal", vbCritical, "Se requiere unidad de caudal"  
Exit Sub  
End If
```

If K2 = 0 Then

```
MsgBox "Seleccione una unidad para la presión atmosférica", vbCritical, "Se requiere unidad de presión"  
Exit Sub
```

End If

If K3 = 0 Then

```
MsgBox "Seleccione una unidad para la temperatura ambiental", vbCritical, "Se requiere unidad de temperatura"  
Exit Sub
```

End If

If K4 = 0 Then

```
MsgBox "Seleccione una unidad para la temperatura de flujo", vbCritical, "Se requiere unidad de temperatura"  
Exit Sub
```

End If

If K5 = 0 Then

```
MsgBox "Seleccione una unidad para la longitud equivalente", vbCritical, "Se requiere unidad de longitud"  
Exit Sub
```

End If

If K6 = 0 And Val(Text7.Text) <> 0 Then

```
MsgBox "Seleccione una unidad para la Cota de entrada", vbCritical, "Se requiere unidad de altura"  
Exit Sub
```

End If

If K7 = 0 And Val(Text8.Text) <> 0 Then

```
MsgBox "Seleccione una unidad para la Cota de salida", vbCritical, "Se requiere unidad de altura"  
Exit Sub
```

End If

```
FT = TTv  
FG = TG
```

If TP1 = 0 And TP2 <> 0 Then

```
FP = TP2 * 14.2233
```

Elseif TP1 <> 0 And TP2 = 0 Then

```
FP = TP1 * 14.2233
```

Elseif TP1 <> 0 And TP2 <> 0 Then

FP = 2 / 3 * (TP1 + TP2 - TP1 * TP2 / (TP1 + TP2)) * 14.2233

End If

Compresibilidad

Tz = FZcomp

Ts = (0.0684 * (Th2 - Th1) * TG) / (TTf * Tz)

If TP1 = 0 And TD = 0 And TP2 > 0 Then

If K9 = 0 Then

MsgBox "Seleccione una unidad para la presión de descarga", vbCritical, "Se requiere unidad de presión"

Exit Sub

End If

If TP2 > 0 And TP2 < 3.515 Then 'Tabla de caída de presión kgf/cm^2 por cada 100 pie (30,84 m) de tubería

TDP = 0.00879

Elseif TP2 >= 3.515 And TP2 < 7.03 Then

TDP = 0.0176

Elseif TP2 >= 7.03 Then

TDP = 0.0352

Else
End If

Ts = (0.0684 * (Th2 - Th1) * TG) / (TTf * Tz)

TD = (TQ / 0.009018) ^ 0.3953 * (TP0 / TT0) ^ 0.4032 -
* (0.03048 * TTf * Tz * TG ^ 0.961 / ((TP2 + TDP) ^ 2 - Exp(Ts) * TP2 ^ 2)) ^ 0.2016 'diámetro en mm

TP1 = (TI * TTf * Tz * TG ^ 0.961 * (TQ / (0.009018 * TD ^ 2.53)) ^ 1.96 * (TP0 / TT0) ^ 2 +
Exp(Ts) * TP2 ^ 2) ^ 0.5 'presión de entrada en kgf/cm^2

TP1 = TP1 * 98.0665

TD1 = TD / 1000 'Diámetro en m

TD2 = TD / 25.4 'Diámetro en pulg

TQ2 = TQ / 86400 * TP0 / TP2 * TTf / TT0 'Caudal en la descarga m^3/s

TV = 1.27324 * TQ2 / TD1 ^ 2 'Velocidad máxima m/s (descarga)

TV1 = TV * 3.28 'Velocidad máxima ft/s

TVeros = 100 * (10.37 * TTf * 1.8 / (TP2 * 14.2233 * TG * 29)) ^ 0.5 'Velocidad de erosión ft/s

'Cálculo de la viscosidad

TDensidad = TP2 * 14.2233 * TG * 29 / (10.37 * TTf * 1.8)

TDensidadv = 0.01601846 * TDensidad

TKv = 0.0001 * (9.4 + 0.02 * TG * 28.9644) * TTv ^ 1.5 / (209 + 19 * TG * 28.9644 + TTv)

TXv = 3.5 + 986 / TTv + 0.01 * TG * 28.9644
TYv = 2.4 - 0.2 * TXv

TViscosidad = TKv * Exp(TXv * TDensidadv ^ TYv)

TRe = TD * TV * 16.01846 * TDensidad / TViscosidad

Load Form5
Form5.Label3 = CCur(TD1)
Form5.Label6 = CCur(TD)
Form5.Label9 = CCur(TP1)
Form5.Label12 = CCur(TP3)
Form5.Label15 = CCur(TViscosidad)
Form5.Label21 = CLng(TRe)
Form5.Label18 = CCur(TV)
Form5.Label17 = CCur(TVeros / 3.28084)
Form5.Label22 = CCur(Tz)

Form5.Show vbModal

Elseif TP1 = 0 And TD > 0 And TP2 > 0 Then

If K9 = 0 Then

MsgBox "Seleccione una unidad para la presión de descarga", vbCritical, "Se requiere unidad de presión"

Exit Sub

End If

If K10 = 0 Then

MsgBox "Seleccione una unidad para el Diámetro Interno", vbCritical, "Se requiere unidad de longitud"

Exit Sub

End If

TP1 = ((TQ / (0.009018 * TD ^ 2.53)) ^ 1.961 * (TP0 / TT0) ^ 2 * TI * TTf * Tz * TG ^ 0.961 +
Exp(Ts) * TP2 ^ 2) ^ 0.5

TD1 = TD / 1000

TP1 = 98.0665 * TP1

TD1 = TD / 1000 'Diámetro en m

TD2 = TD / 25.4 'Diámetro en pulg

TQ2 = TQ / 86400 * TP0 / TP2 * TTf / TT0 'Caudal en la descarga m³/s

TV = 1.27324 * TQ2 / TD1 ^ 2 'Velocidad máxima m/s (descarga)

TV1 = TV * 3.28 'Velocidad máxima ft/s

TVeros = 100 * (10.37 * TTf * 1.8 / (TP2 * 14.2233 * TG * 29)) ^ 0.5 'Velocidad de erosión ft/s

TDensidad = TP2 * 14.2233 * TG * 29 / (10.37 * TTf * 1.8)

TDensidadv = 0.01601846 * TDensidad

```
TKv = 0.0001 * (9.4 + 0.02 * TG * 28.9644) * TTv ^ 1.5 / (209 + 19 * TG * 28.9644 + TTv)
TXv = 3.5 + 986 / TTv + 0.01 * TG * 28.9644
TYv = 2.4 - 0.2 * TXv
```

```
TViscosidad = TKv * Exp(TXv * TDensidadv ^ TYv)
```

```
TRe = TD * TV * 16.01846 * TDensidad / TViscosidad
```

```
Load Form5
```

```
Form5.Label3 = CCur(TD1)
Form5.Label6 = CCur(TD)
Form5.Label9 = CCur(TP1)
Form5.Label12 = CCur(TP3)
Form5.Label15 = CCur(TViscosidad)
Form5.Label21 = CLng(TRe)
Form5.Label18 = CCur(TV)
Form5.Label17 = CCur(TVeros / 3.28084)
Form5.Label22 = CCur(Tz)
```

```
Form5.Show vbModal
```

```
Elseif TP1 > 0 And TD = 0 And TP2 > 0 Then
```

```
If K8 = 0 Then
```

```
MsgBox "Seleccione una unidad para la Presión de Succión", vbCritical, "Se requiere unidad de presión"
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If K9 = 0 Then
```

```
MsgBox "Seleccione una unidad para la presión de descarga", vbCritical, "Se requiere unidad de presión"
Exit Sub
```

```
End If
```

```
TD = ((TQ / 0.009018) ^ 0.3953 * (TP0 / TT0) ^ 0.4032 * (TI * TTf * Tz * TG ^ 0.961 / (TP1 ^ 2 - Exp(Ts) * TP2 ^ 2)) ^ 0.2016)
```

```
TD1 = TD / 1000
```

```
TP1 = 98.0665 * TP1
```

```
TD1 = TD / 1000 'Diámetro en m
```

```
TD2 = TD / 25.4 'Diámetro en pulg
```

```
TQ2 = TQ / 86400 * TP0 / TP2 * TTf / TT0 'Caudal en la descarga m3/s
```

```
TV = 1.27324 * TQ2 / TD1 ^ 2 'Velocidad máxima m/s (descarga)
```

```
TV1 = TV * 3.28 'Velocidad máxima ft/s
```

```
TVeros = 100 * (10.37 * TTf * 1.8 / (TP2 * 14.2233 * TG * 29)) ^ 0.5 'Velocidad de erosión ft/s
```

```
TDensidad = TP2 * 14.2233 * TG * 29 / (10.37 * TTf * 1.8)
```

```
TDensidadv = 0.01601846 * TDensidad
```

```
TKv = 0.0001 * (9.4 + 0.02 * TG * 28.9644) * TTv ^ 1.5 / (209 + 19 * TG * 28.9644 + TTv)
```

```
TXv = 3.5 + 986 / TTv + 0.01 * TG * 28.9644
```

```
TYv = 2.4 - 0.2 * TXv
```

$TViscosidad = TKv * Exp(TXv * TDensidadv ^ TYv)$

$TRe = TD * TV * 16.01846 * TDensidad / TViscosidad$

Load Form5

Form5.Label3 = CCur(TD1)
Form5.Label6 = CCur(TD)
Form5.Label9 = CCur(TP1)
Form5.Label12 = CCur(TP3)
Form5.Label15 = CCur(TViscosidad)
Form5.Label21 = CLng(TRe)
Form5.Label18 = CCur(TV)
Form5.Label17 = CCur(TVeros / 3.28084)
Form5.Label22 = CCur(Tz)

Form5.Show vbModal

Elseif TP1 > 0 And TD > 0 And TP2 = 0 Then

$TA = TP1 ^ 2 / Exp(Ts)$

$TB = (TQ / (0.009018 * TD ^ 2.53)) ^ 1.961 * (TP0 / TT0) ^ 2 * Tl * Ttf * Tz * TG ^ 0.961 / Exp(Ts)$

If TA > TB Then

$TP2 = (TA - TB) ^ 0.5$
TP3 = CCur(TP2 * 98.0665)
TD1 = CCur(TD / 1000)

TD1 = TD / 1000 'Diámetro en m

TD2 = TD / 25.4 'Diámetro en pulg

$TQ2 = TQ / 86400 * TP0 / TP2 * Ttf / TT0$ 'Caudal en la descarga m³/s

$TV = 1.27324 * TQ2 / TD1 ^ 2$ 'Velocidad máxima m/s (descarga)

TV1 = TV * 3.28 'Velocidad máxima ft/s

$TVeros = 100 * (10.37 * Ttf * 1.8 / (TP2 * 14.2233 * TG * 29)) ^ 0.5$ 'Velocidad de erosión ft/s

$TDensidad = TP2 * 14.2233 * TG * 29 / (10.37 * Ttf * 1.8)$

$TDensidadv = 0.016018 * TDensidad$

$TKv = 0.0001 * (9.4 + 0.02 * TG * 28.9644) * TTV ^ 1.5 / (209 + 19 * TG * 28.9644 + TTV)$

$TXv = 3.5 + 986 / TTV + 0.01 * TG * 28.9644$

$TYv = 2.4 - 0.2 * TXv$

$TViscosidad = TKv * Exp(TXv * TDensidadv ^ TYv)$

$TRe = TD * TV * 16.01846 * TDensidad / TViscosidad$

Load Form5

Form5.Label3 = CCur(TD1)
Form5.Label6 = CCur(TD)
Form5.Label9 = CCur(TP4)
Form5.Label12 = CCur(TP3)
Form5.Label15 = CCur(TViscosidad)
Form5.Label21 = CLng(TRe)
Form5.Label18 = CCur(TV)
Form5.Label17 = CCur(TVeros / 3.28084)
Form5.Label22 = CCur(Tz)

Form5.Show vbModal

Else

MsgBox "Caida de presión excesiva. Debe seleccionar un diámetro mayor.", vbCritical, "Pérdidas excesivas en tubería"

Load Form2

```
Exit Sub
End If

Elseif TP1 = 0 And TP2 = 0 And TD <> 0 Then

    MsgBox "Seleccione además del diámetro interno, una presión", vbCritical, "Error al introducir
datos de diseño"
    Exit Sub

Elseif TP1 <> 0 And TP2 = 0 And TD = 0 Then

    MsgBox "Seleccione además de la presión entrada, un diámetro tentativo, o una presión de
descarga", vbCritical, "Error al introducir datos de diseño"
    Exit Sub

Else

    MsgBox "Introduzca valores numéricos positivos de P1, P2 o D siguiendo las instrucciones.",
vbCritical, "Error al introducir datos de diseño"
    Exit Sub

End If

End Sub
```

CODIGO DEL MODULO REDES DE TUBERIAS

```
Private Sub combo1_click()  
    Select Case Combo1.ListIndex  
        Case 0  
            K1 = 0.0101972 'convierte Kpa a kgf/cm^2  
        Case 1  
            K1 = 10.1972 'convierte Mpa a kgf/cm^2  
        Case 2  
            K1 = 1 'conserva la presión en kgf/cm^2  
        Case 3  
            K1 = 0.07031 'convierte psi a kgf/cm^2  
    End Select  
End Sub  
  
Private Sub combo2_click()  
    Select Case Combo2.ListIndex  
        Case 0  
            K2 = 1 'conserva la temperatura en Kelvin  
        Case 1  
            K2 = 1 'convierte grados centigrados a Kelvin  
        Case 2  
            K2 = 0.5556 'convierte grados Rankine a Kelvin  
        Case 3  
            K2 = 0.5556 'convierte grados Farenheit a Kelvin  
    End Select  
End Sub  
  
Private Sub combo3_click()  
    Select Case Combo3.ListIndex  
        Case 0  
            K3 = 1 'conserva la temperatura en Kelvin  
        Case 1  
            K3 = 1 'convierte grados centigrados a Kelvin  
        Case 2  
            K3 = 0.5556 'convierte grados Rankine a Kelvin  
        Case 3  
            K3 = 0.5556 'convierte grados Farenheit a Kelvin  
    End Select  
End Sub  
  
Private Sub Command1_Click()  
  
    RP0 = K1 * Val(Text1.Text)  
    RT0 = K2 * Val(Text2.Text)  
    RTf = K3 * Val(Text3.Text)  
    RG = Val(Text4.Text)  
    nod = Val(Text6.Text)  
    tram = Val(Text7.Text)  
  
    If Val(Text1.Text) <= 0 Then  
        MsgBox "La presión atmosférica debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir  
presión atmosférica"  
        Exit Sub  
    End If  
  
    If Val(Text4.Text) <= 0 Then
```

```
MsgBox "La gravedad específica debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir gravedad específica"
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If Val(Text6.Text) <= 0 Then
```

```
MsgBox "El número de nodos debe tener un valor entero positivo", vbCritical, "Error al introducir número de nodos"
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If Val(Text7.Text) <= 0 Then
```

```
MsgBox "El número de tramos debe tener un valor entero positivo", vbCritical, "Error al introducir número de tramos"
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If K1 = 0 Then
```

```
MsgBox "Seleccione una unidad para la presión atmosférica", vbCritical, "Se requiere unidad de presión"
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If K2 = 0 Then
```

```
MsgBox "Seleccione una unidad para la temperatura ambiental", vbCritical, "Se requiere unidad de temperatura"
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If K3 = 0 Then
```

```
MsgBox "Seleccione una unidad para la temperatura de flujo", vbCritical, "Se requiere unidad de temperatura"
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If Combo2.ListIndex = 1 Then
RT0 = Val(Text2.Text) + 273.15
ElseIf Combo2.ListIndex = 3 Then
RT0 = 5 / 9 * Val(Text2.Text) + 255.37
End If
```

```
If Combo3.ListIndex = 1 Then
RTf = Val(Text3.Text) + 273.15
ElseIf Combo3.ListIndex = 3 Then
RTf = 5 / 9 * Val(Text3.Text) + 255.37
End If
```

```
If RT0 <= 0 Then
```

```
MsgBox "La temperatura ambiental absoluta debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir temperatura ambiental"
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If RTf <= 0 Then
```

```
    MsgBox "La temperatura media de flujo absoluta debe tener un valor real positivo", vbCritical,  
    "Error al introducir temperatura media de flujo"  
    Exit Sub
```

```
End If
```

```
ReDim X(tram), Y(tram), D(tram), diam1(tram), Leq(tram), _  
A(nod, nod), B(nod, nod), QC(nod), _  
Pnod(nod), Sol(nod), M(nod), Cons1(tram), Cons2(tram), _  
Constant(tram), MSOL(nod), PSOL(nod), PreSol(nod), TOL(nod), _  
Caudesc(tram), CaudSol(tram), VelMax(tram), VelEros(tram), _  
Densidad(nod), Viscosidad(nod), h(nod), PreSolSI(nod), CaudsolSI(tram), _  
Densidadv(nod), Kv(nod), Xv(nod), Yv(nod), Reynolds(tram), Con1T(tram), _  
Con2T(tram), Tramd1(tram), TramL1(tram), K1T(tram), K2T(tram), X1(tram), _  
X2(tram), d1(tram), L1(tram), d1T(tram), L1T(tram), K1N(nod), K2N(nod), K3N(nod), _  
caudcarga(nod), Presnod(nod), altura(nod), caudcarga1(nod), Presnod1(nod), altura1(nod), _  
Cheq1(nod), opcion1(nod), opcion2(nod), Cheq1(nod), RZprom(tram)
```

```
For j = 1 To tram
```

```
    Load Forma15  
    Forma15.Label5 = j  
    Forma15.Text1 = X(j)  
    Forma15.Text2 = Y(j)  
    Forma15.Text3 = Tramd1(j)  
    Forma15.Text4 = TramL1(j)  
    Forma15.Combo1.ListIndex = Con1T(j)  
    Forma15.Combo2.ListIndex = Con2T(j)
```

```
    If Con1T(j) = 0 And Con2T(j) = 0 Then  
        Forma15.Combo1.ListIndex = -1  
        Forma15.Combo2.ListIndex = -1  
    End If
```

```
    If j = tram Then  
        Forma15.Command1.Caption = "Ir a Nodos"  
    End If
```

```
Forma15.Show vbModal
```

```
X(j) = X1(j)  
Y(j) = X2(j)  
D(j) = d1(j)  
Leq(j) = L1(j)  
Con1T(j) = K1T(j)  
Con2T(j) = K2T(j)  
Tramd1(j) = d1T(j)  
TramL1(j) = L1T(j)
```

```
If Tramoanterior = 1 Then  
    If j = 1 Then j = 0  
    If j > 1 Then j = j - 2  
    Tramoanterior = 0  
End If
```

```
If Salidatramo = 1 Then
```

```

Solidatramo = 0
Exit Sub
End If

Next j

For i = 1 To nod

Load Forma18
Forma18.Label6 = i
Forma18.Label7 = i
Forma18.Label10 = i
Forma18.Text1 = caudcarga1(i)
Forma18.Text2 = Presnod1(i)
Forma18.Text3 = altura1(i)
Forma18.Combo1.ListIndex = K1N(i)
Forma18.Combo2.ListIndex = K2N(i)
Forma18.Combo3.ListIndex = K3N(i)

If K1N(i) = 0 And K2N(i) = 0 And K3N(i) = 0 Then

Forma18.Combo1.ListIndex = -1
Forma18.Combo2.ListIndex = -1
Forma18.Combo3.ListIndex = -1

End If

If opcion1(i) = True Then

Forma18.Option1.Value = True

Elseif opcion2(i) = True Then

Forma18.Option2.Value = True

Else

End If

If Cheq1(i) = 1 Then
Forma18.Check1.Value = 1
End If

If i = nod Then
Forma18.Command1.Caption = "Calcular Red"
End If

Forma18.Show vbModal

QC(i) = caudcarga(i)
Pnod(i) = Presnod(i)
h(i) = altura(i)

MSOL(i) = Fija

If Nodoanterior = 1 Then
If i = 1 Then i = 0
If i > 1 Then i = i - 2
Nodoanterior = 0
End If

If Salidanodo = 1 Then
Salidanodo = 0
Exit Sub
End If

Next i

```

```

For i = 1 To nod
    M(i) = Pnod(i) ^ 2
Next i

FT = 1.8 * RTf
FG = RG

SolMatriz

If Cierre = 1 Then
    Cierre = 0
    Exit Sub
End If

RTV = 1.8 * RTf

For i = 1 To nod

    PreSol(i) = M(i) ^ 0.5 'Presión en kgf/cm^2
    Densidad(i) = 16.0185 * PreSol(i) * 14.2233 * RG * 29 / (10.37 * RTf * 1.8) 'densidad en kg/m^3
    PreSolSI(i) = 98.066135802 * PreSol(i) 'Presión en KPa

    'Cálculo de la viscosidad
    Densidadv(i) = 0.001 * Densidad(i)

    Kv(i) = 0.0001 * (9.4 + 0.02 * RG * 28.9644) * RTV ^ 1.5 / (209 + 19 * RG * 28.9644 + RTV)
    Xv(i) = 3.5 + 986 / RTV + 0.01 * RG * 28.9644
    Yv(i) = 2.4 - 0.2 * Xv(i)

    Viscosidad(i) = Kv(i) * Exp(Xv(i) * Densidadv(i) ^ Yv(i))

Next i

For j = 1 To tram

    diam1(j) = D(j) / 1000
    CaudSol(j) = 0.009018 * (RT0 / RP0) ^ 1.02 * D(j) ^ 2.53 * (((PreSol(X(j)) ^ 2 - Exp(0.0684 * RG *
(h(Y(j)) - h(X(j))) / (RTf * RZprom(j))) * PreSol(Y(j)) ^ 2) / (Leq(j) * RTf * RZprom(j) * RG ^ 0.961)) ^
0.51)
    Caudesc(j) = CaudSol(j) / 86400 * RP0 / PreSol(Y(j)) * RTf / RT0
    CaudsolSI(j) = CaudSol(j) / 86400
    VelMax(j) = 1.27324 * Caudesc(j) / (diam1(j)) ^ 2
    VelEros(j) = 100 * (10.37 * RTf * 1.8 / (PreSol(Y(j)) * 14.2233 * RG * 29)) ^ 0.5 / 3.28083989501
    Reynolds(j) = D(j) * VelMax(j) * Densidad(Y(j)) / Viscosidad(Y(j))

Next j

Load Formb24
Formb24.Label2 = n
Formb24.Show vbModal

End Sub

```

ALGORITMO DE SOLUCION DE LA MATRIZ

```
Public Sub SolMatriz()  
  
For n = 1 To 1000 'Comienza el proceso iterativo de solución de la matriz  
  
For j = 1 To tram  
If M(X(j)) <= 0 Or M(Y(j)) <= 0 Then  
MsgBox "No fue posible completar el proceso iterativo con éxito. Revise sus datos e intente de nuevo", vbCritical, "Error en cálculo de la matriz"  
Cierre = 1  
Exit Sub  
End If  
  
FP = 2 / 3 * (M(X(j)) ^ 0.5 + M(Y(j)) ^ 0.5 - M(X(j)) ^ 0.5 * M(Y(j)) ^ 0.5 / (M(X(j)) ^ 0.5 + M(Y(j)) ^ 0.5) * 14.2233  
  
Compresibilidad  
RZprom(j) = FZcomp  
  
If M(X(j)) - Exp(0.0684 * RG * (h(Y(j)) - h(X(j))) / (RTf * RZprom(j))) * M(Y(j)) <= 0 Then  
MsgBox "No fue posible completar el proceso iterativo con éxito. Revise sus datos e intente de nuevo", vbCritical, "Error en cálculo de la matriz"  
Cierre = 1  
Exit Sub  
End If  
  
Cons1(j) = 0.009018 * (RT0 / RP0) ^ 1.02 * D(j) ^ 2.53 / ((Leq(j) * RTf * RZprom(j) * RG ^ 0.961) ^ 0.51)  
  
Cons2(j) = (M(X(j)) - Exp(0.0684 * RG * (h(Y(j)) - h(X(j))) / (RTf * RZprom(j))) * M(Y(j))) ^ 0.49  
Constant(j) = Cons1(j) / Cons2(j)  
  
Next j  
  
For i = 1 To nod 'Se formará la matriz a(i,j)  
For j = 1 To tram  
If X(j) = i Then  
A(i, i) = A(i, i) - Constant(j)  
A(i, Y(j)) = A(i, Y(j)) + Exp(0.0684 * RG * (h(Y(j)) - h(X(j))) / (RTf * RZprom(j))) * Constant(j)  
ElseIf Y(j) = i Then  
A(i, i) = A(i, i) - Exp(0.0684 * RG * (h(Y(j)) - h(X(j))) / (RTf * RZprom(j))) * Constant(j)  
A(i, X(j)) = A(i, X(j)) + Constant(j)  
Else  
End If  
Next j  
Next i
```

w = nod 'Proceso de formación de la matriz reducida.

ReDim F(w, w), QC1(w), u(w, w), l(w, w)

For i = 1 To nod
For j = 1 To nod

F(i, j) = A(i, j)
QC1(i) = QC(i)
A(i, j) = 0

Next j
Next i

For i = 1 To w

If M(i) = MSOL(i) Then

w = w - 1
For di = 1 To i - 1
QC1(di) = QC1(di) - F(di, i) * M(i)
Next di

For di = i To w
For E = 1 To i - 1
F(di, E) = F(di + 1, E)
F(E, di) = F(E, di + 1)
Next E

For E = i To w
F(di, E) = F(di + 1, E + 1)
Next E

QC1(di) = QC1(di + 1) - F(di + 1, i) * M(i)

Next di

ReDim Reduc(w, w), QC2(w), u(w, w), l(w, w)

End If

Next i

If w = nod Then

MsgBox "Debe seleccionar al menos una presión como fija para el proceso iterativo", vbCritical,
"No se fijó ninguna presión de la red"

Cierre = 1
Exit Sub
End If

For i = 1 To w
For j = 1 To w

Reduc(i, j) = F(i, j)

Next j

QC2(i) = QC1(i)

Next i

'Se inicia el proceso de resolución del sistema de ec. lineales

u(1, 1) = Reduc(1, 1) 'primer elemento de u

For i = 1 To w

l(i, i) = 1 'diagonal principal de l

```

Next i

For j = 2 To w

u(1, j) = Reduc(1, j) / l(1, 1) 'primera fila de u
l(j, 1) = Reduc(j, 1) / u(1, 1) 'primera columna de l

Next j

For i = 2 To w - 1

For mi = 1 To i - 1
R = R + l(i, mi) * u(mi, i)
Next mi
u(i, i) = 1 / l(i, i) * (Reduc(i, i) - R)
R = 0
If u(i, i) = 0 Then
MsgBox "No fue posible completar el proceso iterativo con exito. Revise sus datos e intente de
nuevo", vbCritical, "Error en cálculo de la matriz"
Cierre = 1
Exit Sub
End If

For j = i + 1 To w

For ki = 1 To i - 1

V = V + l(i, ki) * u(ki, j)
Bi = Bi + l(j, ki) * u(ki, i)

Next ki
u(i, j) = 1 / l(i, i) * (Reduc(i, j) - V)
l(j, i) = 1 / u(i, i) * (Reduc(j, i) - Bi)
V = 0
Bi = 0

Next j

Next i

For ki = 1 To w - 1
R = R + l(w, ki) * u(ki, w)
Next ki
u(w, w) = 1 / l(w, w) * (Reduc(w, w) - R)
R = 0

ReDim zSOL(w), xSOL(nod), M1(nod), TOL(nod)

zSOL(1) = QC2(1) / l(1, 1)

For i = 2 To w
For j = 1 To i - 1
V = V + l(i, j) * zSOL(j)
Next j

zSOL(i) = 1 / l(i, i) * (QC2(i) - V)
V = 0
Next i

xSOL(w) = zSOL(w) / u(w, w)

For i = w - 1 To 1 Step -1

For j = i + 1 To w
R = R + u(i, j) * xSOL(j)

```

```

Next j
xSOL(i) = 1 / u(i, i) * (zSOL(i) - R)
R = 0
Next i

fijo = 0
For i = 1 To nod
  If M(i) <> MSOL(i) Then
    M1(i) = xSOL(i - fijo)

  ElseIf M(i) = MSOL(i) Then
    fijo = fijo + 1
    M1(i) = M(i)

  End If
Next i

cerrar = 0
For i = 1 To nod
  TOL(i) = Abs(M(i) - M1(i))

  If TOL(i) < 0.0001 Then
    cerrar = cerrar + 1
  End If
Next i

If cerrar = nod Then Exit For

For i = 1 To nod
  M(i) = M1(i)
  M1(i) = 0
Next i

For i = 1 To w
  For j = 1 To w
    Reduc(i, j) = 0
    u(i, j) = 0
    l(i, j) = 0

  Next j
  QC2(i) = 0
Next i

For i = 1 To nod
  For j = 1 To nod
    F(i, j) = 0
  Next j
  QC1(i) = 0
Next i

Next n

End Sub

```

ALGORITMO DE CALCULO DEL FACTOR DE COMPRESIBILIDAD

Public Sub Compresibilidad()

FPpc = (709.604 - 58.718 * FG)
FTpc = (170.491 + 307.344 * FG)

FPpr = FP / FPpc
FTpr = FT / FTpc

If FPpr >= 0.2 And FPpr <= 1.2 Then

 If FTpr >= 1.05 And FTpr <= 1.2 Then

 FZcomp = FPpr * (1.6643 * FTpr - 2.2114) - 0.3647 * FTpr + 1.4385

 Elseif FTpr > 1.2 And FTpr <= 1.4 Then

 FZcomp = FPpr * (0.5222 * FTpr - 0.8511) - 0.0364 * FTpr + 1.049

 Elseif FTpr > 1.4 And FTpr <= 2 Then

 FZcomp = FPpr * (0.1391 * FTpr - 0.2988) + 0.0007 * FTpr + 0.9969

 Elseif FTpr > 2 And FTpr <= 3 Then

 FZcomp = FPpr * (0.0211 * FTpr - 0.0527) + 0.0127 * FTpr + 0.9549

 End If

Elseif FPpr > 1.2 And FPpr <= 2.8 Then

 If FTpr >= 1.05 And FTpr <= 1.2 Then

 FZcomp = FPpr * (-1.357 * FTpr + 1.4942) + 4.6315 * FTpr - 4.7009

 Elseif FTpr > 1.2 And FTpr <= 1.4 Then

 FZcomp = FPpr * (0.1717 * FTpr - 0.3232) + 0.5869 * FTpr + 0.1229

 Elseif FTpr > 1.4 And FTpr <= 2 Then

 FZcomp = FPpr * (0.0984 * FTpr - 0.2053) + 0.0621 * FTpr + 0.858

 Elseif FTpr > 2 And FTpr <= 3 Then

 FZcomp = FPpr * (0.0211 * FTpr - 0.0527) + 0.0127 * FTpr + 0.9549

 End If

Elseif FPpr > 2.8 And FPpr <= 5.4 Then

 If FTpr >= 1.05 And FTpr <= 1.2 Then

 FZcomp = FPpr * (-0.3278 * FTpr + 0.4752) + 1.8223 * FTpr - 1.9036

 Elseif FTpr > 1.2 And FTpr <= 1.4 Then

 FZcomp = FPpr * (-0.2521 * FTpr + 0.3871) + 1.6087 * FTpr - 1.6635

```
Elseif FTpr > 1.4 And FTpr <= 2 Then
    FZcomp = FPpr * (-0.0284 * FTpr + 0.0625) + 0.4714 * FTpr - 0.0011
Elseif FTpr > 2 And FTpr <= 3 Then
    FZcomp = FPpr * (0.0041 * FTpr + 0.0039) + 0.0607 * FTpr + 0.7927
End If
Elseif FPpr > 5.4 Then
    FZcomp = FPpr * (0.711 + 3.66 * FTpr) ^ -1.4667 - 1.637 / (0.319 * FTpr + 0.522) + 2.071
Else
    FZcomp = 1
End If
End Sub
```

ALGORITMO DE SELECCIÓN DE COMPRESORES

```
Private Sub Command1_Click()

If Val(Text1.Text) <= 0 Then

    MsgBox "El caudal debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir caudal"
    Exit Sub
End If

If Val(Text3.Text) <= 0 Then

    MsgBox "La presión de entrada debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir
Presión de entrada"
    Exit Sub
End If

If Val(Text4.Text) <= 0 Then

    MsgBox "La presión de descarga debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir
Presión de descarga"
    Exit Sub
End If

If Val(Text5.Text) <= 0 Then

    MsgBox "La gravedad específica debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error al introducir
gravedad específica"
    Exit Sub
End If

If Val(Text6.Text) <= 0 Then

    MsgBox "El número de etapas del compresor debe tener un valor entero positivo", vbCritical, "Error
al introducir número de etapas"
    Exit Sub
End If

CQ = K1 * Val(Text1.Text)
CT0 = K2 * Val(Text2.Text)
CP1 = K3 * Val(Text3.Text)
CP2 = K4 * Val(Text4.Text)
CG = Val(Text5.Text)
CN = Val(Text6.Text)

If CP1 > CP2 Then

    MsgBox "La presión de descarga de la tubería debe ser mayor que la presión de entrada",
vbCritical, "Error en datos"
    Exit Sub

End If

If Combo2.ListIndex = 1 Then
    CT0 = Val(Text2.Text) + 273.15
Elseif Combo2.ListIndex = 3 Then
    CT0 = 5 / 9 * Val(Text2.Text) + 255.37
End If

If CT0 <= 0 Then
```

```
MsgBox "La temperatura atmosférica absoluta debe tener un valor real positivo", vbCritical, "Error  
al introducir Presión de entrada"  
Exit Sub  
End If
```

```
If CQ >= 0.548578 And CQ <= 3.291468 And CP2 >= 10 And CP2 <= 60000 Then
```

```
Load Formc28  
Formc28.Label15 = "- De diafragma"
```

```
Elseif CQ > 3.291468 And CQ <= 5.48578 And CP2 > 6000 And CP2 <= 60000 Then
```

```
Load Formc28  
Formc28.Label15 = "- De diafragma"
```

```
Elseif CQ >= 3.291468 And CQ <= 32.91468 And CP2 >= 10 And CP2 <= 6000 Then
```

```
Load Formc28  
Formc28.Label15 = "- De émbolo lubricado o sin lubricar"
```

```
Elseif CQ >= 32.91468 And CQ <= 1097.16 And CP2 >= 300 And CP2 <= 6000 Then
```

```
Load Formc28  
Formc28.Label15 = "- De émbolo lubricado o sin lubricar"
```

```
Elseif CQ >= 32.91468 And CQ <= 1097.16 And CP2 >= 40 And CP2 <= 300 Then
```

```
Load Formc28  
Formc28.Label15 = "- De tornillo"  
Formc28.Label16 = "- De émbolo lubricado o sin lubricar"
```

```
Elseif CQ >= 32.91468 And CQ <= 1097.16 And CP2 >= 10 And CP2 <= 40 Then
```

```
Load formb28  
Formc28.Label15 = "- De paletas deslizantes"  
Formc28.Label16 = "- De émbolo lubricado o sin lubricar"  
Formc28.Label17 = "- De émbolos rotativos"
```

```
Elseif CQ >= 1097.16 And CQ <= 5485.78 And CP2 >= 300 And CP2 <= 6000 Then
```

```
Load Formc28  
Formc28.Label15 = "- Centrífugo radial"  
Formc28.Label16 = "- De émbolo lubricado o sin lubricar"
```

```
Elseif CQ >= 1097.16 And CQ <= 5485.78 And CP2 >= 10 And CP2 < 300 Then
```

```
Load Formc28  
Formc28.Label15 = "- Centrífugo radial"  
Formc28.Label16 = "- De émbolo lubricado o sin lubricar"  
Formc28.Label17 = "- De tornillo"
```

```
Elseif CQ >= 5485 And CQ <= 54857.8 And CP2 >= 10 And CP2 <= 6000 Then
```

```
Load Formc28  
Formc28.Label15 = "- Centrífugo radial"
```

```
Elseif CQ >= 54857.8 And CQ <= 548578 And CP2 >= 10 And CP2 <= 6000 Then
```

```
Load Formc28  
Formc28.Label15 = "- Centrífugo axial"
```

```
Elseif CQ >= 5.48578 And CQ <= 5485.78 And CP2 >= 6000 And CP2 <= 12000 Then
```

```
Load Formc28  
Formc28.Label15 = "- De émbolo lubricado"
```

```
Elseif CQ >= 5.48578 And CQ <= 5485.78 And CP2 >= 12000 And CP2 <= 60000 Then
```

```
Load Formc28
Formc28.Label15 = "- De presión máxima"
```

```
Else
```

```
Load Formc28
Formc28.Label15 = "- No hay sugerencias"
```

```
End If
```

```
CA = 4.6435
CB = -0.0079997
CC = 5.8425
CD = 1.1533
CE = 0.020603
CF = 0.000009849
```

```
If CG <> 1 Then
```

```
CCalEspP = CA + CB * (CT0 - 459.67) + CC * CG + CD * CG ^ 2 + CE * (CT0 - 459.67) * CG + CF * (CT0 - 459.67) ^ 2
```

```
CCalEspV = CCalEspP - 1.986
```

```
CK = CCalEspP / CCalEspV
```

```
Elseif CG = 1 Then
```

```
CK = 1.4
```

```
End If
```

```
CHp = 1 / 229 * CN * CK / (CK - 1) * CP1 * CQ * ((CP2 / CP1) ^ ((CK - 1) / (CN * CK)) - 1)
```

```
CkW = 0.74569987 * CHp
```

```
Load Formc28
```

```
Formc28.Label8 = CCur(CkW)
Formc28.Label9 = CCur(CHp)
Formc28.Label10 = CCur(CK)
```

```
Formc28.Show vbModal
```

```
End Sub
```

ANEXO D

PLANOS DE PLANTA

PLANOS DEL PROYECTO NICCA 959

LABORATORIO INTEGRADO DE CAMPO “EL FURRIAL”

PLANO DEL PROYECTO NICCA 986

**INGENIERÍA CONCEPTUAL DE RECOLECCION DE GAS A
BAJA BRESION EN BARE-ARECUNA**

ANEXO E

CORRIDAS DE REDES EN UN SIMULADOR COMERCIAL

PARTE 1

CORRIDA DE UNA RED ABIERTA

PARTE 2

CORRIDA DE UNA RED CERRADA

PARTE 3

CORRIDA DE UNA RED EXISTENTE

PARTE 4

DATOS OPERACIONALES DEL PROYECTO NICCA 986

CAUDALES DE LA RED BARED-ARECUNA

Fuente: PDVSA

TRAMOS	CAUDAL Q [PCD]
1	7.880.000.000
2	19.400.000
3	6.450.000.000
4	17.300.000
5	8.000.000
6	6.000.000
7	1.000.000
8	2.000.000
9	7.880.000
10	7.880.000
11	19.280.000
12	18.730.000
13	18.730.000
14	34.030.000

PRESIONES DE LA RED BARED-ARECUNA

Fuente: PDVSA

CAUDAL	PRESION [psig]
1	960
2	992
3	935
4	927
5	925
6	921
7	919
8	932
9	925
10	923
11	922
12	921
13	921
14	920
15	911.4