

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

APLICACION DE LA PROGRAMACION
DINAMICA AL DISEÑO DE GASODUCTOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
PRESENTA

MA. CRISTINA AMBRIZ MARQUEZ

MEXICO, D.F.

1969



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE
SEGUN EL TEMA

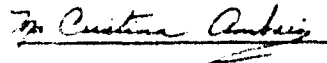
Presidente: I.Q. Raúl Meyer Stoffel
Vocal: I.Q. Miguel A. Vargas Díaz
Secretario: I.Q. Enrique Jiménez Ruiz
1er. Suplente: I.Q. Pablo Barroeta González
2o. Suplente: I.Q. Julio F. Lara Hidalgo

Sitio donde se desarrolló el Tema:

PETROLEOS MEXICANOS
OFICINA DE MECANIZACION Y COMPUTACION

Sustentante:

Ma. Cristina Ambriz Márquez



Asesor del Tema:

I.Q. Enrique Jiménez Ruiz



INDICE DE CAPITULOS

	Pág.
I.- I n t r o d u c c i ó n .	1
II.- A n t e c e d e n t e s .	3
III.- D e s c r i p c i ó n d e l p r o b l e m a : d i s e ñ o d e g a s o d u c t o s : e c u a c i o n e s d e d i s e ñ o .	8
IV.- O p t i m i z a c i ó n : p r o g r a m a c i ó n d i n á m i c a y s u s a p l i c a c i o n e s : r e s o l u c i ó n d e u n e j e m p l o .	27
V.- P l a n t e a m i e n t o d e l p r o b l e m a p a r a l a e l a b o r a c i ó n d e l p r o g r a m a .	45
VI.- R e s u l t a d o s d e l a C o m p u t a d o r a .	52
VII.- C o n c l u s i o n e s .	59
VIII.- B i b l i o g r a f í a .	61
IX.- A p é n d i c e .	65

APLICACION DE LA PROGRAMACION DINAMICA AL DISEÑO DE GASODUCTOS

I.- Introducción

El presente trabajo fué realizado con el fin de probar la eficiencia de una de las técnicas de optimización: la programación dinámica.

El método se aplicó al diseño de gasoductos - en particular al que va de C. Pemex a México - para comparar los resultados obtenidos por medio de la programación dinámica con las condiciones actuales del sistema.

El cálculo de gasoductos se basa fundamentalmente en la obtención de un costo mínimo de transporte, de acuerdo con la inversión y operación de las instalaciones y, al mismo tiempo, se deben satisfacer las necesidades requeridas de eficiencia y seguridad.

Al diseñar el gasoducto deben definirse las características de la tubería: Diámetro, espesor de pared y grado (de dureza del acero), la potencia de las compresoras, el número de éstas y sus espaciamientos.

Considerando que se van a probar N diámetros, que cada diámetro puede tener K espesores y que para cada espesor

hay M grados distintos, habría $N \times K \times M$ situaciones probables. El uso de la programación dinámica desarrollada por Bellman puede reemplazar el problema anterior de variación simultánea de $N \times K \times M$ variables con N problemas de K subproblemas cada uno y dentro de éstos se tienen M posibles alternativas. Esta situación es mucho más fácil de manejar.

II.- Antecedentes

La operación del gasoducto C. Pemex-México comenzó en el año de 1961. Inicialmente se operó con la sola presión de inyección de la Planta de Absorción (1,015 lb/in.²) de su punto original; actualmente tiene 9 estaciones de compresión intermedias en su trayecto. Debido a que no fueron previstas en el diseño del gasoducto las extracciones e inyecciones tan considerables que se le hacen, las condiciones actuales de operación son diferentes a las de diseño.

El primer enfoque de este trabajo era la selección de la alternativa más adecuada que satisficiera las crecientes demandas de gas natural, o sea resolver el problema del aumento en la capacidad del gasoducto. Esa selección partiría de la comparación de los costos anuales que se tendrían en cada una de las alternativas propuestas.

Para llegar a la solución más conveniente es importante hacer un análisis previo de las instalaciones que sería necesario construir para que el sistema pudiese funcionar en las condiciones de operación que fija cada una de las soluciones propuestas. En general, pueden considerarse:

- 1a.- Incremento de potencia en las estaciones de compresión existentes y la construcción de nuevas estaciones sin la instalación de una tubería adicional, con objeto de que la línea actual en servicio, transporte la totalidad del gasto.
- 2a.- Construcción de una tubería paralela a la existente del diámetro necesario, para que sin incrementar la potencia en las actuales estaciones de compresión, ni construir adicionales, se pueda transportar la totalidad del gasto.
- 3a.- Una combinación de las dos soluciones anteriores, consistente en la construcción de una línea paralela, del diámetro adecuado y el correspondiente aumento en la potencia de compresión en las estaciones existentes y/o la construcción de otras adicionales.

Después de un análisis preliminar se encontró que la primera solución sería inoperante, ya que la demanda de gas para el año de 1970 es superior a la capacidad máxima de transporte de la tubería actualmente instalada. La segunda

solución también resulta inadecuada, ya que de acuerdo con las curvas de operación de las compresoras, actualmente instaladas en las estaciones de compresión, éstas no tendrían capacidad suficiente para manejar la demanda estimada para el año de 1970.

Por lo tanto, se juzgó que la tercera sería la única solución factible.

Haciendo un análisis previo para la selección del diámetro económico, se desecharon aquellas alternativas que ofrecían pocas o ningunas ventajas, quedando solamente las siguientes tres alternativas:

- a). Construcción de una nueva línea de 24" de diámetro nominal, paralela a la existente, que es de igual diámetro; adición de la potencia necesaria en las actuales estaciones de compresión, en servicio, y cambio de instalación de serie a paralelo, de manera que puedan manejar la demanda total de gas combustible.
- b). Construcción de una nueva línea de 30" de diámetro nominal, paralela a la existente, y cambio de la

instalación de las compresoras, de serie a paralelo, a fin de que puedan transportar el volumen de gas demandado.

- c). Construcción de una nueva línea de 24" de diámetro nominal, paralela a la existente, que es del mismo diámetro, y la construcción de nuevas estaciones de compresión en aquellos tramos donde se abata demasiado la presión, además del cambio de instalación de las compresoras, de serie a paralelo.

De las tres soluciones se descarta la 2a. por anti-económica, ya que la instalación de tubería de diferente diámetro al existente implicaría un gran aumento en costos de mantenimiento.

Sólo resta elegir la mejor de las otras dos alternativas: Adición de potencia en las actuales estaciones o construcción de nuevas. El construir otras estaciones de compresión daba lugar a un gran aumento de costos por concepto de personal de operación y mantenimiento.

Al llegar a la conclusión anterior se tenía resuelto el problema. Entonces se pensó en el cálculo del mejor

arreglo de compresoras en cada estación. Como para cada estación se tienen dos compresoras, puede haber dos alternativas:

1a.- Conectarlas en paralelo.- En este caso habría que instalar otra compresora de relevo, y el costo de una unidad adicional similar a las existentes es de \$6.000,000.00.

2a.- Conectarlas en serie.- Habría que cambiar el impulsor, cuyo costo promedio se estima en . . . \$283,750.00.

Claramente se observa que la mejor es la 2a. alternativa y entonces ya no tiene caso hacer más cálculos.

Como tercer objetivo se planteó el problema del diseño del gasoducto de C. Pemex a México, para luego comparar el resultado con las condiciones existentes del sistema real. En este caso sí cabe la aplicación de la técnica de Programación Dinámica.

III.- Descripción del Problema

El gas obtenido de la planta de absorción pasa directamente a la tubería a una presión determinada.

Para la operación del gasoducto conviene mantener la presión de entrada durante todo el trayecto, para lo cual es necesario instalar varias estaciones de compresión a lo largo del trazo del gasoducto. Estas estaciones, para comprimir el gas, en general son operadas con compresoras del tipo reciprocante o centrífuga. Para el caso que se estudia, en que el volumen por comprimir es considerable, se recomienda usar compresoras centrífugas que proporcionan suficiente flexibilidad en la operación, ocupan menor espacio y son más económicas en su operación y mantenimiento. Es muy conveniente y en ocasiones necesario que el gasoducto sea en lo posible autosuficiente en su operación, por lo que conviene también que el equipo motriz de las compresoras sea de los que emplean gas para generar la energía mecánica requerida para la operación de las compresoras; por lo tanto, se podrán usar motores de gas reciprocantes o turbinas de gas.

La operación de las estaciones de compresión impli-

ca fundamentalmente prestar atención a los instrumentos de control de las compresoras como los de medición y registro de presiones en la succión y descarga de las líneas, volúmenes y temperaturas del gas comprimido, etc. y, además, a los instrumentos de control de los motores que impulsan estas bombas. Actualmente estas estaciones se pueden operar a control remoto empleando equipo de radio-comunicación y dispositivos automáticos.

También hay que tomar en cuenta el mantenimiento del gasoducto, es decir la atención al equipo de compresión, así como la inspección continua a lo largo de la línea para detectar posibles fugas, arreglar deslaves del terreno, engrasar válvulas, etc., con el objeto de proceder con toda oportunidad a las reparaciones necesarias para el buen funcionamiento del gasoducto.

El método usual de diseño de grandes tuberías dentro de la industria del gas, involucra determinar un cierto número de soluciones de prueba o tanteo para llegar al diseño óptimo que producirá la capacidad requerida para satisfacer las necesidades del mercado, con el mínimo costo.

Diseño de un gasoducto.- Mediante las ecuaciones

de flujo de gas, de la relación de compresión óptima y del factor de supercompresibilidad, es posible diseñar un gasoducto a partir de la longitud del mismo, el gasto por manejar, las propiedades del gas, el perfil de elevaciones del terreno y datos de costos. Realizando el cálculo para diferentes diámetros y obteniendo el costo total anual por concepto de tubería y estaciones compresoras se hace una comparación para seleccionar el diámetro, espesor y grado de tubería que dan un costo anual mínimo.

Ecuación para el flujo de gas.

Recientes investigaciones de la operación a altas presiones desarrollan una fórmula que incluye la fricción en función del Número de Reynolds y que ha dado excelentes resultados. Esta fórmula es la de Panhandle:

$$Q = 435.87 E \left(\frac{T_s}{P_s} \right)^{1.07881} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2}{sg \cdot 0.8639 \cdot TL} \right]^{0.5394} d^{2.5182} \quad (1)$$

en donde:

- Q = Volumen del flujo, MMPCD
- E = Eficiencia de la línea
- T_s = Temperatura standard, 520°R
- P_s = Presión standard, 1473 psia
- P₁ = Presión de entrada a la línea, psia
- P₂ = Presión de salida de la línea, psia
- sg = densidad específica con respecto a la del aire
- T = Temperatura de flujo, 530°R
- L = Longitud de la línea, millas
- d = Diámetro interior de la línea, pulgadas.

Corrección por diferencia de Niveles

Como consecuencia de la variada topografía del terreno por el que atraviesa la línea, se vió la necesidad de introducir esta consideración mediante el uso de la ecuación de Panhandle modificada:

$$Q = 435.87 E \left(\frac{T_2}{P_1} \right)^{1.07801} \left[\frac{(P_1^5 - P_2^5) S}{sg^{0.8734} T L Z (a^2 \cdot l)} \right]^{0.8734} d^{1.6782} \quad (2)$$

en donde

$$S = \frac{0.0375 \text{ sg } (h_2 - h_1)}{ZT} \quad (3)$$

Z = Valor promedio del factor de compresibilidad.

$(h_2 - h_1)$ = Diferencia de niveles entre la entrada y la salida de un tramo, ft.

De la fórmula de Panhandle modificada se puede despejar P_2 ó L:

$$P_2 = \sqrt[5]{\frac{P_1^5}{a^2} - \frac{L(a^2 \cdot l) C_1}{5 C_2^2 E} \dots} \quad (4)$$

$$L_1 = \frac{R^{1.0112} \cdot 10^{10} \cdot 0.0112 \cdot T \cdot Z}{C_1 \cdot d^{1.0112}} \quad (5)$$

$$C_1 = \left[435.07 \left(\frac{T_1}{R} \right)^{1.0112} \right]^{1.0112} \quad (6)$$

$$L_2 = \frac{E^{1.0112} \cdot S \cdot (R^2 - R^2 \cdot e^2)}{C_1 \cdot (e^2 - 1)} \quad (7)$$

Por otra parte, el costo total anual puede integrarse en la siguiente forma:

A). Tubería.

B). Estaciones de Compresión.

A). Tubería.-

a). El costo de la tubería por milla.- Incluye una parte del zanjado, de la pintura, del esmalte y de la envoltura anticorrosiva; la limpieza interior y pruebas neumática e hidráulica, las obras e instalaciones especiales, la inspección radiográfica, la limpieza del derecho de vía, la topografía, la supervisión y la ingeniería.

b). Costo por descarga y tendido.- Incluye el ba-

jado, el alineamiento, la colocación, el doblado y el soldado o acoplamiento.

c). Y el costo por la otra parte del zanjado, rasqueteo, pintado, esmaltado, envoltura anticorrosiva, bajado y tapado, equipo especial de colocación y otros.

En cada uno de los anteriores se debe considerar un porcentaje de cargos fijos (ese porcentaje incluye depreciación, impuestos, seguros, intereses sobre el capital, salarios, personal y todos los gastos de operación cargables al mantenimiento de la línea.

Llamando "F" al costo anual por milla para el primer grupo, "SD" al segundo y "WDT" para el tercero, el costo anual por concepto de tubería sería:

$$F + SD + WDT \quad \$/\text{año-milla} \quad (8)$$

Por otra parte, la expresión de Barlow expresa el espesor de pared de la tubería, $t(\text{in})$, en términos de la presión máxima, $P_m(\text{lb}/\text{in}^2)$, el esfuerzo máximo permisible $S_1(\text{lb}/\text{in}^2)$ y el diámetro exterior de la tubería, $D(\text{in})$:

$$t = \frac{P_m D}{2(S_1 - P_m)} \quad (9)$$

Sustituyendo esta expresión en (8):

$$F + SD + W \left[\frac{P_m D^2}{2(S - R_m)} \right] \quad \text{S/año-milla} \quad (10)$$

B). Estaciones de Compresión.-

Se divide la inversión en los siguientes grupos:

- a). Costo del equipo mecánico y eléctrico.
- b). Instalación del equipo mecánico y eléctrico.
- c). Bases del equipo.
- d). Edificios.
- e). Terrenos.
- f). Tubería y conexiones.
- g). Varios.

De los grupos anteriores se separan los costos fijos que comprenden material y mano de obra; el resto constituye el grupo de costos variables.

Dividiendo el total de costos variables entre la potencia de la estación de compresión se obtiene el costo variable por HP, correspondiente a la inversión inicial.

Los cargos fijos y variables incluyen interés sobre el capital invertido, depreciación, impuestos y seguros.

Hay que considerar también los costos anuales de operación por estación de compresión (incluyendo salarios y prestaciones del personal de operación), los costos anuales de mantenimiento (considerando materiales y mano de obra), el costo de combustibles utilizados en las estaciones de compresión (gas natural) y por último el costo anual de lubricantes, tomando en cuenta la situación de las estaciones de compresión.

A los cargos fijos se les llama "Y" (por estación de compresión) y llamando "M" a los costos variables por potencia para bombear "Q" ft³ de gas por día, a una distancia de "L" millas, se requiere de hZ (BHP/MMPCD), donde "h" es la potencia al freno por MMPCD y "Z" la desviación promedio de la ley de los gases perfectos a la presión de succión, dependiendo únicamente de la relación de compresión necesaria y de la naturaleza del gas.

El costo anual en compresoras es, por lo tanto:

$$Y + MhQZ$$

y por milla:

$$\frac{1}{L} (Y + MhQZ)$$

Entonces la ecuación del costo total anual queda expresada por:

$$C = F + SD + W \left[\frac{P - D'}{S(S - P)} \right] + \frac{1}{L} (Y + MhQZ) \quad (11)$$

- C Costo anual por milla, \$.
- F Costo total anual fijo del sistema de gasoducto por milla.
- S' Costo anual por milla por pulgada de diámetro por milla.
- D Diámetro interior de la tubería, in.
- W Costo anual por milla por pulgada de diámetro interior.
- S, Esfuerzo admisible en la pared del tubo, $\frac{lb}{in^2}$.
- L Longitud, millas.
- Y Resumen de costos anuales fijos por estación compresora.
- M Resumen de costos variables anuales por potencia instalada.
- h BHP requeridos/MMPCD.
- Q Volumen de flujo, MMPCD.
- Z Factor de desviación promedio de la ley de los gases.
- Pm Presión máxima admisible en la tubería, $\frac{lb}{in^2}$.

A partir de la ecuación de costo obtenida, (11) se deriva la ecuación de la relación de compresión óptima. Para obtener el costo mínimo se toma la derivada parcial de "C" con respecto a "R" y se iguala a cero:

$$\frac{dC}{dR} = \frac{MAG}{L} \left(z \frac{dA}{dR} + h \frac{dZ}{dR} \right) - \frac{1}{L} \frac{dL}{dR} (Y + MAGZ) \quad (12)$$

que puede escribirse:

$$\frac{dC}{dR} = \frac{MAGZ}{L} \left(\frac{1}{h} \frac{dA}{dR} + \frac{1}{z} \frac{dZ}{dR} \right) - \frac{1}{L} \frac{dL}{dR} (Y + MAGZ) = 0 \quad (13)$$

La fórmula de Panhandle puede escribirse:

$$L = D^3 (P_1^5 - P_2^5) \left(\frac{EQ}{Q} \right)^{1.8539}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = R, \quad \text{Relación de compresión}$$

$$L = D^3 P_2^5 \left(1 - \frac{1}{R^5} \right) \left(\frac{EQ}{Q} \right)^{1.8539} \quad (14)$$

$$\frac{L}{1 - \frac{1}{R^5}} = D^3 P_2^5 \left(\frac{EQ}{Q} \right)^{1.8539} \quad (15)$$

derivando (14) con respecto a "R":

$$\frac{dL}{dR} = 2D^3 \frac{P_2^5}{R^6} \left(\frac{EQ}{Q} \right)^{1.8539} \quad (16)$$

y sustituyendo (15) en (16):

$$\frac{dh}{dR} = \frac{2L}{\left(1 - \frac{1}{R^2}\right) R^2} \quad (17)$$

En la ecuación (13) el término $\frac{1}{2} \frac{dh}{dR}$ tiene un valor relativamente bajo, por lo que puede despreciarse, y entonces:

$$\frac{MQZ}{L} \frac{\partial h}{\partial R} - \frac{1}{L^2} \frac{dL}{dR} (Y + MhQZ) = 0 \quad (18)$$

Sustituyendo (17) en (18):

$$\frac{MQZ}{L} \frac{dh}{dR} - \frac{1}{L^2} \left[\frac{2L}{R(R^2-1)} \right] (Y + MhQZ) = 0$$

$$\frac{MQZ}{L} \frac{dh}{dR} = \frac{1}{L} \left[\frac{2(Y + MhQZ)}{R(R^2-1)} \right]$$

$$\frac{R(R^2-1)}{2} \frac{dh}{dR} = \frac{Y + MhQZ}{MQZ}$$

$$\frac{R(R^2-1)}{2} \frac{dh}{dR} = \frac{1}{MQZ} + n$$

$$\frac{R(R^2-1)}{2} \frac{dh}{dR} - n = \frac{1}{MQZ} \quad (19)$$

La fórmula empleada para el cálculo de la potencia necesaria de las compresoras, para vencer las caídas de presión en la línea, es:

$$BHP = 3.0325 Q \frac{T_s P_s Z}{T_a P_a Z_a} \left(R^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right)$$

Sustituyendo "Ts" y "Ps" por sus valores

$$\frac{BHP}{Q} = 0.08573 \frac{T_a Z}{Z_a} \left(R^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right)$$

pero como $m = \frac{K-1}{K}$ en donde $K = C_p/C_v$

$$\frac{BHP}{Q} = 0.08573 \frac{T_a Z}{Z_a} \left(R^m - 1 \right)$$

$$Q = 0.08573 \frac{T_a Z}{Z_a} \left(R^m - 1 \right) \quad (20)$$

$$\frac{BHP}{Q} = h$$

$$h = 0. (R^m - 1) \quad (21)$$

Derivando con respecto a "R": (22)

$$\frac{dh}{dR} = m Q R^{m-1}$$

Sustituyendo (22) en (19):

$$\frac{R(R^2-1)}{2} m C_1 R^{m-1} - C_1 (R^m-1) = \frac{Y}{MQZ} \quad (23)$$

Dividiendo entre C_1 :

$$\frac{R(R^2-1)}{2} m R^{m-1} - R^m + 1 = \frac{Y}{C_1 MQZ}$$

$$R^m - \frac{m}{2} R^{m-1} R(R^2-1) = 1 - \frac{Y}{C_1 MQZ}$$

y, entonces, la ecuación de la relación de compresión óptima es:

$$R^m - \frac{m}{2} R^{m-1} (R^2-1) = 1 - \frac{Y}{C_1 MQZ} \quad (24)$$

R Relación de compresión.

y/M Relación de costos fijos entre costos variables.
En la elaboración de estudios se puede emplear $\frac{Y}{M} = 1220$, ya que todos los cálculos hechos con este valor son relativamente correctos y satisfactorios.

Z_s Factor de supercompresibilidad.

La derivación anterior está dada en una publicación privada de Cooper Bessemer Corporation, de 1952.

Ecuaciones empleadas para calcular el factor de supercompresibilidad (Tomadas de: A.G.A. "Manual for the determination of supercompresibility factors for Natural Gas", de Pat. A. Miller).

$$F_{sv} = \frac{\sqrt{\frac{A}{B} - D + \frac{E}{Z^2}}}{1 + \frac{0.00132}{Z^{2.5}}} \quad (25)$$

$$B = \frac{3 - mn^2}{9m^2}$$

$$m = 0.0330378(Z)^{-2} - 0.0221923(Z)^{-3} + 0.0161353(Z)^{-5}$$

$$n = \frac{0.265827(Z)^{-2} + 0.0457497(Z)^{-3} - 0.133185(Z)^{-4}}{m}$$

$$Z = \frac{t_{aj} + 460}{500}$$

$$t_{aj} = [(t + 460) P_T] - 460$$

t = temperatura de flujo, °F

$$F_v = \frac{226.29}{99.16 + 211.9G - K_T}$$

$$K_T = MC - 1.681 MN$$

G = gravedad específica del gas

MC = contenido de CO₂ del gas.

MN = contenido de nitrógeno del gas.

$$\pi = \frac{P_s + 14.7}{1000}$$

$$Pa) = P \times Fp$$

P = presión manométrica, psig

$$Fp = \frac{156.47}{160.8 - 7.22 G + 4.0}$$

$$Kp = MC = 0.392 \text{ MN}$$

$$D = (b + \sqrt{b^2 + 3'})^{1/2}$$

$$b = \frac{90 - 2 \text{ mci}^2}{54 - 3'} - \frac{E}{2.2}$$

El valor de "E" se calcula en función de la presión y la temperatura. Dependiendo del rango de éstas, será la ecuación usada.

$$1). \quad 0 < \pi < 2 \quad 0 < p < 2000 \text{ psia}$$

$$1.09 < Z < 1.4 \quad 85 < t < 240^\circ \text{ F}$$

$$E_s = 1 - 0.00075 (\pi)^{2.3} e^{-20(E-100)} - 0.0011(E-109)^{0.5} (\pi)^2 [2.17 + 1.4(E-109)^{0.5} - \pi]^2 \quad (26)$$

$$2). \quad 0 < \pi < 1.3 \quad 0 < p < 1300 \text{ psia}$$

$$0.84 < Z < 1.09 \quad -40 < t < 85^\circ \text{ F}$$

$$E_2 = 1 - 0.00076 (\pi)^{2.2} [2 - e^{-20(1.09-z)}] - 1.317 (1.09-z)^4 (\pi)(1.69-\pi^2) \quad (27)$$

3). $2.0 < \pi < 5.0$ $2000 < p < 5000$ psia
 $0.88 < z < 1.09$ $-20 < t < 85^\circ$ F

$$E_5 = E_3 - Y$$

$$E_3 = 1 - 0.00075 (\pi)^{2.2} [2 - e^{-20(1.09-z)}] + 0.455 [200(1.09-z)^4 - 0.03249(1.09-z) + 2.0167(1.09-z)^2 - 13.028(1.09-z)^3 + 42.844(1.09-z)^4] (\pi-1.3) [1.69(2)^{z-2.5} - \pi^2] \quad (28)$$

Rango de aplicación de E_3 :

$$1.3 < \pi < 2.0 \quad 1300 < p < 2000$$

$$0.88 < z < 1.09 \quad -20 < t < 85$$

$$Y = A (\pi-2) + A_1 (\pi-2)^2 + A_2 (\pi-2)^3 + A_3 (\pi-2)^4$$

$$A = 1.71720 - 2.33123(z) - 1.56796(z)^2 + 3.47644(z)^3 - 1.28603(z)^4$$

$$A_1 = 0.016299 - 0.028094(z) + 0.48782(z)^2 - 0.728221(z)^3 + 0.27839(z)^4$$

$$\lambda_2 = 0.35978 + 0.51419(z) + 0.16453(z)^2 - \\ 0.52216(z)^3 + 0.19687(z)^4$$

$$\lambda_3 = 0.075255 - 0.10573(z) - 0.058598(z)^2 + \\ 0.14416(z)^3 - 0.054533(z)^4$$

...

Bases para la selección del tipo de compresora,
centrífuga o reciprocante más apropiada.

Compresoras centrífugas.- El consumo de aceite lubricante y los costos de mantenimiento son bajos porque en este tipo de compresoras las únicas partes en movimiento son el impulsor y la flecha. Debido a su baja relación de compresión y bajas pérdidas de fricción, no requieren agua de enfriamiento. El aumento de eficiencia a bajas relaciones contribuye a un considerable ahorro en caballaje total de la línea. Otra ventaja es su alta capacidad para manejar volúmenes grandes.

Compresoras reciprocantes.- Estas máquinas tienen muchas partes móviles y muchas válvulas de succión y de des-

carga, por lo que el consumo de aceite lubricante es mayor y es necesario mantener un inventario de refacciones suficiente. Son extremadamente difíciles de balancear y en ciertos diseños resulta imposible hacerlo. Debido a las relativamente altas temperaturas del cilindro, producidas por la fricción y compresión del gas, algunas compresoras reciprocantes requieren agua de enfriamiento para los cilindros.

Su eficiencia disminuye para bajas relaciones de compresión.

Por todo lo anteriormente expuesto se puede concluir que la compresora que debe emplearse es una centrífuga.

Ahora bien, queda por seleccionar el modo en que se manejará la compresora, es decir, con motor o con turbina de gas.

Como la compresora va a manejar gas natural, es más conveniente elegir la turbina de gas que trabajará con un poco del gas natural que se está transportando.

En el Apéndice se presenta una tabla de costos anuales para compresoras de 3000 BHP.

En resumen, el tipo elegido es la compresora centrífuga manejada con turbina de gas.

IV.- Generalidades sobre Optimización y Programación Dinámica

La Programación Dinámica es un método de optimización. Optimizar significa encontrar "la mejor solución" entre todas las posibles alternativas.

A veces se usa el término "una mejor solución" en lugar de "la mejor solución", porque puede haber más de una solución óptima.

La representación de un problema en forma abstracta o simbólica se conoce como modelo matemático. La caracterización de problemas de optimización por modelos matemáticos viene desde los griegos. A ellos se atribuye la solución de problemas tales como encontrar la figura geométrica de mínimo perímetro que encierra un área dada.

Las teorías de optimización existen mucho antes del desarrollo del cálculo. No obstante el desarrollo formal de la teoría de optimización se deriva del cálculo. Después de la invención del cálculo, los matemáticos trabajaron activamente en problemas de optimización. La teoría fué desarrollada para modelos matemáticos conteniendo variables continuas y funciones diferenciables. Muchos de los problemas estudiados

fueron de carácter geométrico. Aunque la teoría proporcionaba procedimientos de solución para problemas con varias variables, no era adecuada para tratar desde el punto de vista computacional modelos que contenían un gran número de variables.

Sin embargo, generalmente fueron suficientes pocas variables para caracterizar la mayor parte de los problemas geométricos de interés en esa época.

El desarrollo clásico de la teoría de optimización a través del cálculo fué completado a fines del Siglo XIX. Una exposición al respecto se puede ver en Teoría de Máximos y Mínimos de Hancock".

Alrededor de 1940 hubo un cambio de dirección en el estudio de la teoría de optimización. Dos ocurrencias paralelas pero interrelacionadas son especialmente significativas: El trabajo de científicos y matemáticos en problemas de operaciones militares, y la invención y desarrollo de las computadoras digitales. La resolución científica de problemas militares y, luego, después de la guerra, su aplicación a problemas industriales e institucionales vino a ser el campo de estudio conocido como Investigación de Operaciones. La formulación y solución de modelos matemáticos de optimización es

la esencia de la investigación de operaciones.

Un modelo matemático es una representación simbólica de las relaciones entre los diferentes factores en un problema de toma de decisiones.

Los componentes básicos del modelo son:

1.- Las variables $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$.-

Aquellos factores que pueden ser manipulados para alcanzar el objetivo deseado. Estas variables son llamadas comúnmente independientes o variables de decisión.

2.- Los parámetros $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$.-

Aquellos factores que afectan el objetivo pero no son controlables.

3.- La medida de eficiencia (R) .-

El valor, utilidad o recuperación, asociado con valores particulares de las variables de decisión y parámetros. La medida de la eficiencia, alternativamente llamada medida de la utilidad, función criterio, función objetivo o función objeto, es una función real evaluada a partir de las variables de decisión y los parámetros, que puede representarse como:

$$R = R(D, Y)$$

Hay una amplia variedad de medidas de la utilidad que se usan comúnmente, tales como costo, utilidad, rapidez de recuperación, etc. Se considerará que siempre puede ser escogida una medida de la eficiencia que refleje adecuadamente las diferencias importantes entre valores diferentes de las variables de decisión.

4.- La región de probabilidad (S). Generalmente las variables de decisión están limitadas en los valores que pueden asumir. Estas limitaciones están generalmente dadas especificando una región de probabilidad o conjunto de restricciones (S). Los valores posibles para las variables de decisión deben estar contenidos en el conjunto S, (D ∈ S).

Algunas veces es posible representar todo o parte del conjunto de restricciones por ecuaciones y/o desigualdades de la forma.

$$f_i(D) \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} 0 \quad i = 1, \dots, m$$

Las ecuaciones o desigualdades que determinan la región de probabilidad son generalmente llamadas restricciones. Cualquier "D" que satisface las restricciones se conoce como una solución posible al modelo. El problema de toma de decisiones es encontrar una solución posible que dé un valor alto de la utilidad. Una solución óptima (D^*) se define como una posible solución que produzca la mayor utilidad posible, o sea:

$$R(Y) = R(D^*, Y) \geq R(D, Y) \\ = \max_D R(D, Y)$$

$$D \in S$$

Significado de "r": Pertenece al conjunto.

Para todo problema, el óptimo $R(Y)$ es único (cuando existe), pero puede haber más de una solución óptima.

La gran ventaja de un modelo matemático es su generalidad y facilidad de manipulación. Es difícil presentar una clasificación para modelos matemáticos de toma de decisiones, pero es útil hacer algunas distinciones.

En modelos determinísticos la utilidad está dada por valores específicos de las variables de decisión. No hay

variables incontrolables o al azar. En contraste, los modelos estocásticos o probabilísticos contienen variables al azar que no pueden ser controladas y cuyos valores pueden expresarse como distribuciones de probabilidad. Un modelo determinístico puede considerarse como un caso especial de un modelo estocástico, en el cual cada variable al azar asume un valor particular con probabilidad de "1" y todos los otros valores con probabilidad "0".

Habiendo construido un modelo matemático apropiado, hay que elegir una técnica para resolver el modelo. La manera de determinar una solución óptima depende, por supuesto, de la forma de la función objetivo y de las restricciones, la naturaleza y número de variables, el tipo de facilidades computacionales, el criterio y la experiencia.

A veces, antes de llevar a cabo la optimización, es deseable hacer algunos cambios de variables y transformaciones. En contraste para simplificar el modelo, estas operaciones preparatorias preservan las propiedades del modelo completamente. El modelo transformado tiene la misma solución óptima que el original, pero es de una forma que puede optimizarse más fácilmente.

Básicamente, la programación dinámica es esta transformación. Toma un proceso de decisiones, secuencial o de varias etapas, que contiene muchas variables interdependientes y lo convierte en una serie de problemas de una etapa, conteniendo cada uno sólo algunas variables. La transformación se basa en el Principio de Optimización de Bellman, que dice:

"Una política óptima tiene la propiedad de que cualesquiera que sean el estado inicial y la decisión final, las decisiones restantes deben constituir una política óptima con respecto al estado resultante de la primera decisión".

Se puede decir que un problema con N variables de decisión puede transformarse en N subproblemas, conteniendo cada uno sólo una variable de decisión. Los cálculos aumentan exponencialmente con el número de variables, pero sólo linealmente con el número de subproblemas.

Algunos de los problemas que se han atacado por la programación dinámica son: Teoría de inventarios, problemas de distribución, inversión de capital, teoría de control, y diseño en ingeniería química. La propiedad básica de estos problemas es que las decisiones se pueden calcular secuencialmente. El método de cálculo secuencial es la esencia de la

programación dinámica. Por ejemplo: Considérese un proceso químico consistente de un calentador, un reactor y una torre de destilación conectados en serie. Se desea determinar la temperatura óptima en el calentador, la velocidad de reacción óptima, y el número óptimo de platos en la torre de destilación. Todas estas decisiones son interdependientes.

Sin embargo, para cualesquier temperatura y velocidad de reacción que sean escogidas, el número de platos debe ser óptimo con respecto a la salida del reactor. Usando este principio, puede decirse que el número óptimo de platos se determina como una función de la salida del reactor. Como aún no se conoce la temperatura óptima o la velocidad de reacción, el número óptimo de platos y el reflujo de la torre deben encontrarse para todas las salidas posibles del reactor.

Continuando secuencialmente, puede decirse que, para cualquier temperatura que sea elegida, la velocidad de la reacción y el número de platos deben ser óptimos con respecto a la salida del calentador. Para elegir la mejor velocidad de reacción como una función de la salida del calentador, debe tomarse en cuenta la dependencia de la torre de destilación de la salida del reactor. Como se conoce el reflujo óptimo de la torre como una función de la salida del reactor, la velocidad óptima

de reacción puede determinarse como una función de la entrada al reactor, optimizando el reactor junto con el reflujo óptimo de la torre como una función de la salida del reactor.

En la toma de decisiones en forma secuencial, como una función de las decisiones precedentes, el primer paso es determinar el número de platos en función de la salida del reactor. Luego la velocidad óptima de reacción se establece como una función de la entrada al reactor. Finalmente, la temperatura óptima se determina como una función de la entrada al calentador.

La Programación Dinámica se había practicado antes de recibir este nombre. Un trabajo de Wald sobre teoría de decisiones secuenciales¹⁹ contiene los principios de un procedimiento de programación dinámica. Dos escritos de Dvoretzky, Kiefer y Wolfowitz²⁰ sobre teoría de inventarios son verdaderamente el espíritu de la programación dinámica.

Indudablemente, sin embargo, Richard Bellman es el padre de la programación dinámica. Sus investigaciones en la Corporación Rand en la década de los 50's llevaron a la publicación de un gran número de documentos (sobre programación dinámica) culminando en su primer libro sobre la teoría de la -

programación dinámica³ publicado en 1957. Luego publicó un libro sobre la aplicación de la programación dinámica a teoría de control⁴ y un libro sobre Programación Dinámica aplicada,⁵ escrito en colaboración con S. Dreyfus.

R. Aris ha escrito un libro sobre el diseño de reactores químicos¹ y uno más general sobre programación dinámica discreta.²

Howard ha escrito acerca de la relación entre programación dinámica y procesos de Markov;¹² Tou, sobre la optimización de control de procesos;¹⁸ Roberts, sobre programación dinámica en ingeniería química;¹⁶ Johnson discute y enfatiza la aplicabilidad a procesos químicos usando el problema de reemplazamiento de catalizador como un ejemplo.¹³

Dreyfus ha presentado una discusión sobre los aspectos computacionales de los modelos de programación dinámica.⁷

A continuación se exponen los principios del método. Bajo su aspecto analítico, la programación dinámica es objeto de una teoría bastante complicada, en la que tienen aplicación numerosos teoremas del cálculo y en el caso de procesos continuos del cálculo de Variaciones, pero en el aspecto del cálculo numérico, el método resulta muy simple y es fácil efectuar

a mano los cálculos; cuando la magnitud del problema lo requiera puede hacerse uso de una computadora.

Se había citado que la propiedad básica de los problemas que pueden resolverse con esta técnica es su método de cálculo secuencial. Un problema de decisiones en secuencia puede descomponerse en fases o etapas ordenadas. Una etapa puede ser una unidad de tiempo, como un minuto o una hora, puede ser una unidad de equipo, como un plato en una columna de destilación o un reactor en un sistema de varios reactores. El estado del sistema es el conjunto de variables que pueden usarse para describir el sistema en cualquier etapa. Por ejemplo, en el problema de reemplazamiento de equipo, el estado del sistema es la edad del equipo. En algunos problemas puede ser difícil especificar claramente dicho estado del sistema.

En un proceso de decisiones de varias etapas, a medida que el proceso pasa de una etapa a otra, el estado del sistema también cambia. La transición de etapa a etapa y de estado a estado se describe por medio de ecuaciones funcionales.

Una ecuación funcional típica es:

$$f_n(x) = \text{Max}_{0 \leq y_n \leq 1} [g_n(y_n) + f_{n-1}(x - y_n)] \quad (29)$$

la cual es la representación matemática del Principio de Optimización que se emplea en todos los problemas de Programación Dinámica.

El término " f " se refiere a un objetivo, o utilidad que va a evaluarse por el Principio de Optimización. El subíndice " N " de la " f " se refiere al número de etapas restantes en el proceso. La " x " en el paréntesis se refiere al estado del sistema en la etapa N .

La ecuación (29) establece que el lado izquierdo de la ecuación es igual no al término entre paréntesis del lado derecho, sino igual al máximo de ese término.

Abajo del símbolo Max hay una variable limitada, " Y_N ", que designa que la maximización se llevará a cabo escogiendo el valor más apropiado para Y_N entre los límites de 0 a x . La Y_N es la variable de decisión.

El término $g_N(Y_N)$ representa la ganancia obtenida durante la etapa N por la elección óptima de Y_N en la región $(0, x)$. Si se representa la elección óptima de Y_N como Y_N^* , el estado del sistema se altera de x , en la etapa N , a $(x - Y_N^*)$ en la etapa $(N - 1)$.

El valor óptimo de la función sobre las $(N-1)$ eta-

pas restantes está dado por $f_{N-1}(x - Y_N^*)$. El término $f_{N-1}(x - Y_N^*)$ representa la utilidad acumulada sobre las $(N - 1)$ etapas restantes empezando en el estado $(x - Y_N^*)$.

De manera similar la expresión para $f_{N-1}(x - Y_N^*)$ puede calcularse por:

$$f_{N-1}(x - Y_N^*) = \text{MAX}_{Y_{N-1} \in x - Y_N^*} \left[g_{N-1}(Y_{N-1}) + f_{N-2}(x - Y_N^* - Y_{N-1}) \right]$$

En esta ecuación se observa que la elección de Y_{N-1} se restringe a la región de 0 a $(x - Y_N^*)$ ya que la cantidad original de x ha sido reducida a $(x - Y_N^*)$ debido a la distribución de Y_N^* en la etapa N .

Resolución de un ejemplo.

En los procesos industriales, el problema de reemplazamiento de equipo es muy importante. Estos problemas se caracterizan por la disminución de la productividad y la eficiencia del equipo al paso del tiempo.

El determinar cuando debe reemplazarse una pieza del equipo depende de la productividad, del costo de mantenimiento

de su valor de rescate y del costo de un nuevo equipo.

Se va a considerar un período de tiempo de N años, en el cual se desea determinar el ciclo óptimo de reemplazamiento.

t = tiempo transcurrido desde la adquisición del equipo.

$r(t)$ = Valor de la productividad por año de una pieza de equipo de t años.

$u(t)$ = Costo de mantenimiento por año del equipo de t años.

$s(t)$ = Valor de rescate del equipo a los t años.

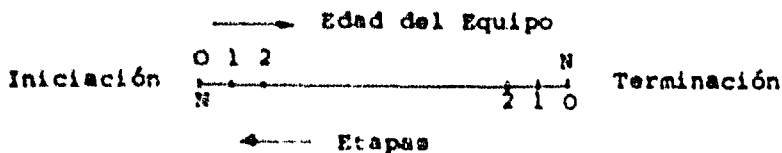
p = Precio de compra del equipo.

En este proceso las funciones $r(t)$, $u(t)$ y $s(t)$ son conocidas.

Definiendo:

$f_N(t)$ = Utilidad máxima del equipo de t años sobre los años restantes del proceso usando una política óptima.

La edad del equipo se cuenta hacia adelante, o sea, que $t=0$ representa una nueva pieza de equipo. Las etapas de tiempo del proceso se cuentan hacia atrás, de modo que $N=1$ se refiere a una etapa de tiempo restante, y $N=N$ se refiere al principio del proceso.



En cada etapa del proceso de N etapas se debe tomar una decisión para conservar o reemplazar el equipo. La decisión que dé la utilidad total más alta, es la que se debe seleccionar.

Las ecuaciones funcionales basadas en el principio de optimización son:

$$f_N(t) = \text{Max} \left\{ \begin{array}{ll} r(t) - u(t) + f_{N-1}(t+1) & \text{Conservar} \\ s(t) - p + r(0) - u(0) + f_{N-1}(1) & \text{Reemplazar} \end{array} \right\} \quad (30)$$

$$f_1(t) = \text{Max} \left\{ \begin{array}{ll} r(t) - u(t) & \text{Conservar} \\ s(t) - p + r(0) - u(0) & \text{Reemplazar} \end{array} \right\} \quad (31)$$

La ecuación (30) describe el proceso de N etapas y la ecuación (31) el de una etapa. Ambas ecuaciones consisten de dos partes. La ecuación superior en cada una describe la utilidad para la posibilidad de conservar el equipo; mientras que la ecuación inferior se refiere a la utilidad por reemplazamiento del equipo e iniciar otra vez con equipo nuevo.

Las ecuaciones (30) y (31) son expresiones de recurrencia que evalúan $f_N(t)$ en términos de $f_{N-1}(t+1)$. En estas

ecuaciones se observa que al pasar de una etapa a la siguiente, la edad del equipo aumenta de t a $(t+1)$ y que el número de etapas restantes disminuye de N a $(N-1)$. Las dos ecuaciones requieren que ambas alternativas, de reemplazamiento y conservación del equipo, se evalúen y que se seleccione la utilidad mayor.

En esta forma se obtienen: La política de decisión para conservar o reemplazar, el equipo y la utilidad asociada con esta decisión.

Ahora, se considerará el ejemplo numérico.

Sean:

$$r(t) - u(t) = n(t)$$

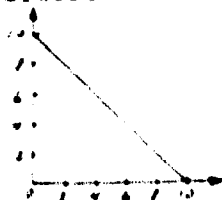
$$s(t) = 0$$

$$p = 10$$

Los valores de $n(t)$ vs. t están dados como:

t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$n(t)$	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	0	0

Graficando se obtiene:



Sustituyendo en las ecuaciones (30) y (31):

$$f_0(t) = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} n(t) + f_{0...}(t+1) \quad C \\ -p + n(0) + f_{0...}(1) \quad R \end{array} \right\} \quad (32)$$

$$f_1(t) = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} n(t) \quad C \\ -p + n(0) \quad R \end{array} \right\} \quad (33)$$

La evaluación numérica es la siguiente:

Para un proceso de una etapa y $t=0$, se escribe

$$\begin{aligned} f_0(0) &= \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} n(0) \quad C \\ -p + n(0) \quad R \end{array} \right\} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} 10 \quad C \\ -10 + 10 \quad R \end{array} \right\} \\ &= 10 \quad (\text{Conservar}) \end{aligned}$$

Para un proceso de una etapa y $t=1$:

$$\begin{aligned} f_1(1) &= \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} n(1) \quad C \\ -p + n(0) \quad R \end{array} \right\} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} 9 \quad C \\ -10 + 10 \quad R \end{array} \right\} \\ &= 9 \quad (\text{Conservar}). \end{aligned}$$

Continuando de esta manera se puede desarrollar $f_1(t)$ que aparece como hilera 1 de la tabla B) del Apéndice.

Debe notarse en todos los casos, que en la ecuación (33) $n(t) > -p + n(0)$, de modo que la decisión es siempre conservar el equipo en el proceso de una etapa.

Para un proceso de dos etapas y $t=0$, se escribe:

$$f_2(t) = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} n(t) + f_1(t) \quad C. \\ -p + n(t) + f_1(t) \quad R. \end{array} \right\} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} 10 + 9 = 19 \quad C. \\ -10 + 10 + 9 = 9 \quad R. \end{array} \right\}$$

$$= 19 \quad (\text{Conservar})$$

Para un proceso de dos etapas y $t=1$:

$$f_2(t) = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} n(t) + f_1(2) \quad C. \\ -p + n(t) + f_1(2) \quad R. \end{array} \right\} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} 9 + 8 = 17 \quad C. \\ -10 + 10 + 9 = 9 \quad R. \end{array} \right\}$$

$$= 17 \quad (\text{Conservar})$$

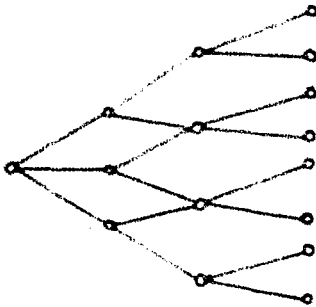
Continuando en esta forma se desarrolla $f_2(t)$, que aparece como hilera 2 en la tabla. De la hilera 2 se genera $f_3(t)$ que aparece como hilera 3, etc.

En la tabla, la "R" que aparece después de un número, identifica la decisión de reemplazar el equipo.

Hay dos regiones de decisión: De un lado de la línea la decisión es reemplazar; del otro es conservar el equipo. De la tabla puede determinarse fácilmente la política de reemplazamiento: por ejemplo, empezando con una pieza nueva de equipo en un proceso de 15 etapas, la decisión es operar desde la etapa 15 hasta la etapa 10 donde dicha decisión cambia a reemplazar. El proceso se opera de la etapa 10 a la etapa 5 donde otra vez el equipo debe reemplazarse.

V.- Planteamiento del problema para la elaboración del programa.

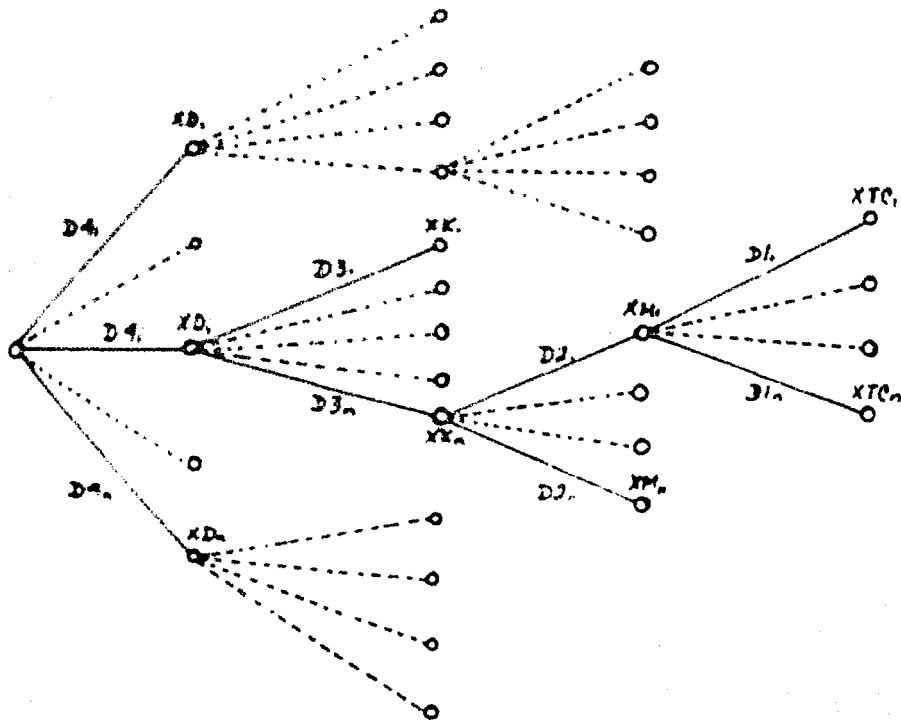
Un sistema de decisiones de varias etapas en el cual cada decisión y variable de estado puede tomar solamente un número finito de valores se puede representar gráficamente por un árbol de decisiones:



Los círculos llamados nodos, corresponden a los estados, y las líneas entre los círculos, llamados arcos, corresponden a las decisiones. Con cada arco se asocian una utilidad y una salida. La utilidad de una trayectoria es la suma de las utilidades de los arcos incluidos en la trayectoria. El objetivo es determinar una trayectoria que dé la máxima utilidad.

En el problema del diseño de gasoductos se planteó

una red de costos después de calcular el número de estaciones compresoras y su potencia. La representación gráfica del sistema de decisiones actual es la siguiente:



El sistema tiene cuatro etapas. Los nodos están representados por las variables de decisión: XD_i y representan

los diámetros que se van a probar.

XK_i , son cada uno de los espesores que puede tener cada diámetro.

XM_i , son los grados de dureza del acero de la tubería.

XTQ_i son los diferentes tipos de compresoras.

Los arcos representan las decisiones a cada una de las cuales se asocia una utilidad.

En la etapa 1, las decisiones $D1_i$, también llevan a la elección del tipo de compresora que dé el mínimo costo.

En la etapa 2, la utilidad asociada con las decisiones $D2_i$, también, es el costo de compresión.

Para la etapa 3, con las decisiones $D3_i$, también se asocia el costo de la tubería.

Y finalmente, las decisiones $D4_i$, también están asociadas con el costo de instalación de la tubería.

Las ecuaciones funcionales basadas en el principio de optimización son

$$f_4(XD_i) = \text{Min}_{D1_i, D2_i, D3_i, D4_i} [g_4(XD_i, D4_i) + f_3(XK_i)] \quad (34)$$

$$f_3(XK_i) = \text{Min}_{D3_i, D2_i, D1_i} [g_3(XK_i, D3_i) + f_2(XM_i)] \quad (35)$$

$$f_2(XM) = \frac{M_{in}}{D_1 + D_2 + D_3} [\beta_2 (XK_1, D_2) + L(XTC_1)] \quad (36)$$

$$f_1(XTC) = \frac{M_{in}}{D_1 + D_2 + D_3} \beta_1 (XTC_1) \quad (37)$$

Además hay que tomar en cuenta que las ecuaciones para calcular el número de estaciones pueden considerarse como restricciones, ya que los costos de compresión son función del número de estaciones. Esas ecuaciones son:

La ecuación de flujo de Panhandle:

$$Q = 435.87 E \left[\frac{P_1^2 - P_2^2}{\gamma G^2 L} \right]^{0.5594} D^{2.6672}$$

o la ecuación corregida cuando existe diferencia de niveles:

$$Q = 435.87 E \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 + \rho g H S}{\gamma G^2 L} \right]^{0.5594} D^{2.6672}$$

La ecuación que da la relación de compresión óptima:

$$R^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} R^{-\frac{1}{2}} (R^2 - 1) = 1 - \frac{Y}{C, HQZ}$$

La ecuación para calcular la potencia:

$$HHP = 25.1 QZ (R^2 - 1)$$

La ecuación de Barlow:

$$C = \frac{1.27 D}{2.3 - P_{in}}$$

Y la ecuación del factor de supercompresibilidad:

$$F_{sv} = \frac{\sqrt{\frac{B}{S} - D + \frac{n}{3H}}}{1 + \left(\frac{A00132}{C^{1.16}}\right)}$$

Los pasos que se siguieron para elaborar el programa son:

Fijar un gasto promedio por medio de la gráfica de consumo de gas natural que se encuentra en el Apéndice.

Calcular el número de estaciones de compresión y su potencia a partir de la longitud del gasoducto, del diámetro, espesor y grado de la tubería, y de las propiedades del gas, aplicando las ecuaciones de Panhandle, la de la relación de compresión óptima, la de la potencia y la de Barlow.

Con los costos y las ventajas de los diversos tipos de compresoras que vienen en el Apéndice, puede elegirse la mejor y así queda resuelta la etapa 1.

El siguiente paso es resolver la etapa 2: Cada grado de tubería tiene asociado el esfuerzo admisible en la misma y por consiguiente la presión de descarga de las compresoras (presión máxima de operación en el gasoducto), de ésta, depende el número de estaciones de compresión.

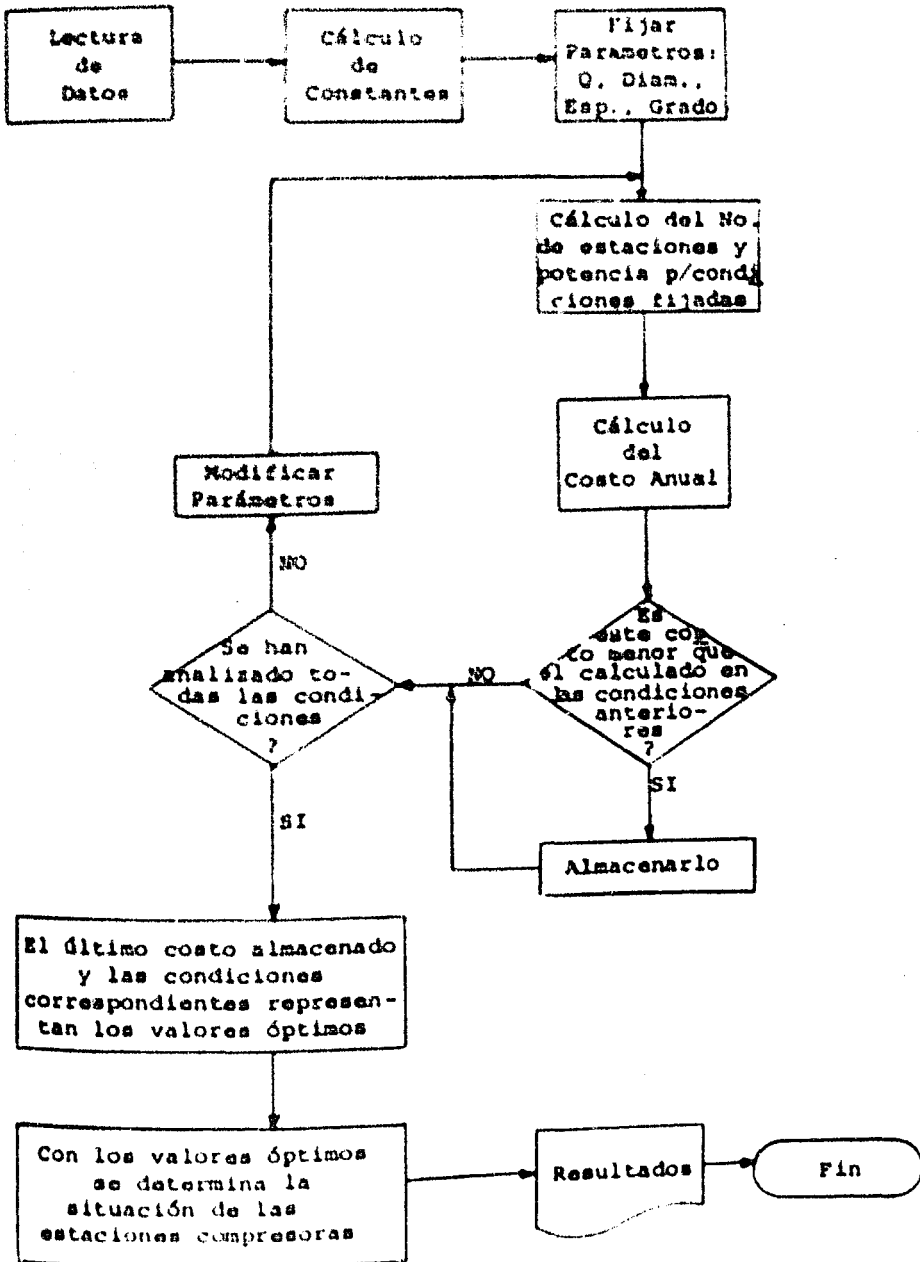
Pasando a la etapa 3: Con la decisión tomada en la etapa 1 para cada nodo XM y el número de estaciones encontrado, se calcula el costo de compresión, como se indica en el Apéndice, y se le suma el costo de la tubería que depende también del diámetro, espesor y grado de dureza del acero. Se elige el mínimo valor de esa suma para cada nodo XD. En esta forma queda resuelta la etapa 3.

Finalmente, para resolver la etapa 4, se calcula el costo de instalación de la tubería, se le suma el mínimo hallado en la etapa 3 y se elige el valor mínimo total, el cual es el valor de la función objeto.

La numeración de las etapas se usa en esta forma para estar de acuerdo con el orden en el cual se determinan las transformaciones.

A continuación se presenta un diagrama de bloques que indica de manera general los pasos que sigue el programa elaborado. En el Apéndice puede verse el diagrama de flujo completo.

DIAGRAMA DE BLOQUES.



VI.-RESULTADOS DE LA COMPUTADORA.
 DISEÑO DEL GASODUCTO CUERPÉMEX-MEXICO APLICANDO PROGRAMACION DINAMICA.
 LONGITUD DEL GASODUCTO=160.4 KILOMETROS.

TRANSPORTE GAS NATURAL.

		C O S T O A M U A L				
		ETAPA NO.4	ETAPA NO.3	ETAPA NO.2	ESTACIONES	
		(B)	(B)	(B)		
ESPESES (P.S.)	GRADO					
10. 0-3125	B	13401800.00	13401800.00	1342781600.00	306	
10. 0-3125	A-42	97778000.00	97778000.00	739224576.00	214	
10. 0-3125	A-52	68386000.00	68386000.00	614457600.00	140	
10. 0-3437	B	116479600.00	116479600.00	1136715520.00	254	
10. 0-3437	A-42	81211000.00	81211000.00	790009344.00	180	
10. 0-3437	A-52	559545216.00	559545216.00	517902600.00	110	
10. 0-3750	B	1004194816.00	1004194816.00	974334208.00	222	
10. 0-3750	A-42	707469360.00	707469360.00	675901440.00	154	
10. 0-3750	A-52	477596976.00	477596976.00	443289000.00	101	
10. 0-4375	B	775077000.00	775077000.00	74733800.00	164	
10. 0-4375	A-42	55349776.00	55349776.00	517902000.00	118	
10. 0-4375	A-52	376331520.00	376331520.00	337953024.00	77	
10. 0-5000	B	626156200.00	626156200.00	588124672.00	134	
10. 0-5000	A-42	448654592.00	448654592.00	408177152.00	93	
10. 0-5000	A-52	311448576.00	311448576.00	267729232.00	61	

320556800.00

ESPESOR OPTIMO = 0.5000 PULGADAS.

GRADO OPTIMO = X-52

NUMERO DE ESTACIONES = 61

C O S T O A M U A L

NO. ESTACIONES

ESTACION (P.S.)	ESPEJOR (P.S.)	GRADU	ETAPA NO. 4 (\$)	ETAPA NO. 3 (\$)	ETAPA NO. 2 (\$)	NO. ESTACIONES
20.	0.3125	B	996315776.00		96995388.00	221
20.	0.3125	X-42	710222335.00		680290308.00	151
20.	0.3125	X-52	468006148.00		447678208.00	102
20.	0.3437	B	847392512.00		816341508.00	186
20.	0.3437	X-42	603460808.00		570562216.00	130
20.	0.3437	X-52	413165088.00		377454088.00	86
20.	0.3750	B	738992296.00		702234368.00	160
20.	0.3750	X-42	527116288.00		491568176.00	112
20.	0.3750	X-52	359078400.00		320370588.00	73
20.	0.4375	B	573285376.00		535458048.00	122
20.	0.4375	X-42	413331712.00		373062216.00	85
20.	0.4375	X-52	269190656.00		245784240.00	56
20.	0.5000	B	468704000.00		425733120.00	97
20.	0.5000	X-42	339863200.00		294063108.00	67
20.	0.5000	X-52	242581184.00		193116224.00	44

252682432.00

ESPEJOR OPTIMO = 0.5000 PULGADAS.

GRADU OPTIMO = X-52

NUMERO DE ESTACIONES = 44

C O S T O A N U A L

NO. ESTACIONES

ETAPA NUM. 4 (B) ETAPA NUM. 3 (B) ETAPA NUM. 2 (B)

GRADO

ESPESOR (P.S.)

24.	0.2500	B	845603326.00	616341504.00	136
24.	0.2500	X-42	605910526.00	57453080.00	131
24.	0.2500	X-52	415464800.00	381843200.00	87
24.	0.2812	B	690785024.00	658345964.00	150
24.	0.2812	X-42	49448832.00	465234176.00	106
24.	0.2812	X-52	344421632.00	307230208.00	70
24.	0.3125	B	579056128.00	544235776.00	124
24.	0.3125	X-42	416612736.00	381843200.00	97
24.	0.3125	X-52	244515712.00	254562240.00	58
24.	0.3437	B	49894512.00	46045056.00	105
24.	0.3437	X-42	365035776.00	324746176.00	74
24.	0.3437	X-52	263244464.00	219450224.00	50
24.	0.3750	B	436477440.00	395016000.00	90
24.	0.3750	X-42	320226304.00	276507136.00	63
24.	0.3750	X-52	231969648.00	184338224.00	42
24.	0.4375	B	200025000.00	302841088.00	69
24.	0.4375	X-42	265522912.00	215061232.00	49
24.	0.4375	X-52	195316592.00	140448224.00	32
24.	0.5000	B	295860736.00	241395232.00	55
24.	0.5000	X-42	223878672.00	171171232.00	39
24.	0.5000	X-52	172487680.00	109725232.00	25

184911856.00

ESPESOR OPTIMO = 0.5000 PULGADAS.

GRADO OPTIMO = X-52

NUMERO DE ESTACIONES = 25

C O S T O A N O S

		C O S T O A N O S			E S T A C I O N E S	
NÚMERO (Puls.)	ESPELOR (Puls.)	GRADO	ETAPA No.1	ETAPA No.2	ETAPA No.3	NÚMERO DE ESTACIONES
			(S)	(S)	(S)	
30.	0.2012	B	140740872.00	140740872.00	140740872.00	21
30.	0.2012	A-42	254901000.00	254901000.00	254901000.00	41
30.	0.2012	A-52	142711504.00	142711504.00	142711504.00	13
30.	0.3175	B	271415276.00	271415276.00	271415276.00	56
30.	0.3175	A-42	273373136.00	273373136.00	273373136.00	81
30.	0.3175	A-52	174386600.00	174386600.00	174386600.00	34
30.	0.3437	B	200762400.00	200762400.00	200762400.00	49
30.	0.3437	A-42	241972376.00	241972376.00	241972376.00	34
30.	0.3437	A-52	101658720.00	101658720.00	101658720.00	24
30.	0.3750	B	254102732.00	254102732.00	254102732.00	41
30.	0.3750	A-42	107447112.00	107447112.00	107447112.00	30
30.	0.3750	A-52	153319232.00	153319232.00	153319232.00	21
30.	0.4375	B	207500320.00	207500320.00	207500320.00	33
30.	0.4375	A-42	170246576.00	170246576.00	170246576.00	24
30.	0.4375	A-52	140708672.00	140708672.00	140708672.00	16
30.	0.5000	B	105197360.00	105197360.00	105197360.00	26
30.	0.5000	A-42	157257074.00	157257074.00	157257074.00	19
30.	0.5000	A-52	137508112.00	137508112.00	137508112.00	13

154255680.00

ESPELOR OPTIMO = 0.5000 PULGADAS.

GRADO OPTIMO = A-52

NÚMERO DE ESTACIONES = 13

ESTACIONES DE ESTACIONES

ESTACION	ESTACION	ESTACION	ESTACION	ESTACION
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
34.	U. 3125	U. 3125	U. 3125	U. 3125
34.	U. 3125	U. 3125	U. 3125	U. 3125
34.	U. 3125	U. 3125	U. 3125	U. 3125
34.	U. 3437	U. 3437	U. 3437	U. 3437
34.	U. 3437	U. 3437	U. 3437	U. 3437
34.	U. 3437	U. 3437	U. 3437	U. 3437
34.	U. 3750	U. 3750	U. 3750	U. 3750
34.	U. 3750	U. 3750	U. 3750	U. 3750
34.	U. 3750	U. 3750	U. 3750	U. 3750
34.	U. 4375	U. 4375	U. 4375	U. 4375
34.	U. 4375	U. 4375	U. 4375	U. 4375
34.	U. 4375	U. 4375	U. 4375	U. 4375
34.	U. 5000	U. 5000	U. 5000	U. 5000
34.	U. 5000	U. 5000	U. 5000	U. 5000
34.	U. 5000	U. 5000	U. 5000	U. 5000

147100404.00

EXPESUR OPTIMO = 0.3437 PULGADAS.

GRADO OPTIMO = K-52

NUMERO DE ESTACIONES = 14

U. S. I. R. 1950-51

ESTACIONES

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

ESTACION (a)	ESTACION (b)	ESTACION (c)	ESTACION (d)	ESTACION (e)
30.	0.3125	16674000.00	16674000.00	16674000.00
30.	0.3125	18110000.00	18110000.00	18110000.00
30.	0.3125	17920000.00	17920000.00	17920000.00
30.	0.3437	14970000.00	14970000.00	14970000.00
30.	0.3437	13170000.00	13170000.00	13170000.00
30.	0.3437	12131000.00	12131000.00	12131000.00
30.	0.3750	14930000.00	14930000.00	14930000.00
30.	0.3750	13650000.00	13650000.00	13650000.00
30.	0.3750	12790000.00	12790000.00	12790000.00
30.	0.4075	14290000.00	14290000.00	14290000.00
30.	0.4075	13380000.00	13380000.00	13380000.00
30.	0.4075	12660000.00	12660000.00	12660000.00
30.	0.5000	14550000.00	14550000.00	14550000.00
30.	0.5000	13620000.00	13620000.00	13620000.00
30.	0.5000	12490000.00	12490000.00	12490000.00

143623712.00

ESPESUR OPTIMO = 0.3437 PULGADAS.

GRADO OPTIMO = X-52

NUMERO DE ESTACIONES = 11

DIAMETRO OPTIMO	=	36. PULGADAS.
ESPEJOR OPTIMO	=	0.3437 PULGADAS.
GRADO OPTIMO	=	X-52
COSTO ANUAL OPTIMO	=	\$143623717.00
NUMERO DE ESTACIONES	=	11
GASTO EN MMPCD	=	800.

SITUACION DE LAS ESTACIONES COMPRESORAS.

EST. NO.	KM.	POTENCIA. BHP	RELACION DE COMPRESION
1	240.8	6236.47	1.15000
2	293.7	6236.47	1.15000
3	346.6	6236.47	1.15000
4	399.5	6236.47	1.15000
5	450.0	6236.47	1.15000
6	502.9	6236.47	1.15000
7	555.0	6236.47	1.15000
8	603.4	6236.47	1.15000
9	655.0	6236.47	1.15000
10	707.0	6236.47	1.15000
11	755.0	6236.47	1.15000

VII.- Conclusiones

De los resultados del programa se obtuvo el mínimo costo para la tubería de 36" de diámetro, espesor 0.3437", API-SLX-52, con un costo anual de: \$143.623,712.00.

Comparando con las características de la tubería que se tiene instalada, la cual es de 24", espesor 0.344", API-SLX-52, como aumenta considerablemente el número de estaciones para poder manejar la demanda estimada, resulta un costo anual de: \$250.820,288.00.

Posiblemente los resultados obtenidos no sean del todo exactos, pero esto se debe a que los datos de costos manejados son aproximados, pero la diferencia entre el costo óptimo obtenido y el costo de la tubería instalada sí se puede considerar como real.

En esta forma se demuestra la eficiencia de la Programación Dinámica. Sus principales ventajas son: Requiere un número mucho menor de cálculos que los métodos clásicos y por consiguiente se logra un gran ahorro del tiempo que se emplea en realizarlos. Si además se construye un programa que realice estos cálculos por medio de una computadora es posible analizar un gran número de situaciones diferentes en un

tiempo relativamente corto. Esto representa una ayuda muy grande para las ejecutivas debido a que disponen de un panorama más amplio del problema en estudio y por consiguiente pueden tomar mejores decisiones.

El campo de aplicación de la Programación Dinámica es bastante amplio y conviene emplearla en un gran número de problemas de optimización. La principal dificultad es identificar el problema, de tal manera de poder decir que puede resolverse aplicando esta técnica, puesto que la aplicación en sí no representa una gran dificultad.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Aris, R.
THE OPTIMAL DESIGN OF CHEMICAL REACTORS
Academic Press - New York, 1961
- 2.- Aris, R.
DISCRETE DYNAMIC PROGRAMMING
Blaisdell - New York, 1964
- 3.- Bellman, R.
DYNAMIC PROGRAMMING
Princeton University Press
Princeton, N. J., 1957
- 4.- Bellman, R.
ADAPTIVE CONTROL PROCESSES
Princeton University Press
Princeton, N. J., 1962
- 5.- Bellman, R. & Dreyfus, S. E.
APPLIED DYNAMIC PROGRAMMING
Princeton University Press
Princeton, N. J., 1962
- 6.- BuKacek, R. F. & Ellington, R. T.
PIPELINE-FLOW EFFICIENCY TESTING
The Oil & Gas Journal, Sept. 23, 1957, Pág. 115
- 7.- Dreyfus, S.
COMPUTATIONAL ASPECTS OF DYNAMIC PROGRAMMING
Operations Research, 5, 409-415, 1957
- 8.- Dvoretzky, J., Kiefer, J., Wolfowitz, J.
THE INVENTORY PROBLEM:
I. CASE OF KNOWN DISTRIBUTIONS OF DEMAND
Econometrica, 20, 187-222, 1952

Bibliografía

2.

- 9.- Dvoretzky A. Miefer J., Wolfowitz, J.
THE INVENTORY PROBLEM :
II CASE OF UNKNOWN DISTRIBUTIONS OF DEMAND
Econometrica. 20. 450 - 466. 1952.
- 10.- Hadley, G.
NONLINEAR AND DYNAMIC PROGRAMMING
Addison - Wesley Publishing Company, Inc.
Massachusetts, 1964.
- 11.- Hancock, H.
THEORY OF MAXIMA AND MINIMA
Dover, New York, 1960.
- 12.- Howard, R.A.
DYNAMIC PROGRAMMING AND MARKOV PROCESSES
John Wiley and Sons.
New York, 1960.
- 13.- Johnson, R. D., Roberts, S. M., Preftzschner, C.A.
OPTIMIZATION AND ITS IMPORTANCE TO CHEMICAL ENGINEER
ING
Presentado en el Congreso Anual del AICHE en San
Francisco, Dic. 7 - 9, 1959.
- 14.- Kaufmann, A.
METODOS Y MODELOS DE LA PROGRAMACION DINAMICA
Mexico, Co. Ed. Continental, S.A. 1966.
- 15.- Nemhauser, G. L.
INTRODUCTION TO DYNAMIC PROGRAMMING.
John Wiley and Sons. Inc.
New York, 1966.

Bibliografie

3.

- 16.- Roberts, S. M.
DYNAMIC PROGRAMMING IN CHEMICAL ENGINEERING
AND PROCESS CONTROL
Academic Press - New York, 1964
- 17.- Schweyer, H. E.
PROCESS ENGINEERING ECONOMICS
McGraw-Hill Book, Co. Inc.
New York, 1955
- 18.- Tou, J. T.
OPTIMUM DESIGN OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS
Academic Press - New York, 1963
- 19.- Wald, A.
STATISTICAL DECISION FUNCTIONS
John Wiley and Sons, Inc.
New York, 1950
- 20.- Wilde & Beightler
FOUNDATIONS OF OPTIMIZATION
Englewood Cliffs, N. J.
Prentice Hall, Inc., 1967
- 21.- Williams, Jr., R. W.
SIX-TENTHS FACTOR AIDS IN APPROXIMATING COSTS
Chemical Engineering - 54 (12) : 124 (1948)

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

Schomaker & Hanna
HOW TO WORK THE REVISED PANHANDLE FORMULA
The Petroleum Engineer - May, 1956 (P. I)
June, 1956 (P.II)

Leach & Redmond
HOW A COMPUTER IS APPLIED TO A
SPECIFIC PROBLEM OF PIPELINE DESIGN
The Oil & Gas Journal

...

APENDICE

- A). Comparación de los Costos de los Diferentes Tipos de Compresoras.
- B). Resolución del Ejemplo del Capítulo IV.
- C). Perfil de Niveles del Gasoducto.
- D). Costos de Instalación de la Tubería.
- E). Costos de Tubería.
- F). Gráfica del Transporte de Gas Natural.
- G). Diagrama de Flujo del Programa.
- H). Listado del Programa.

...

A). COSTOS ANUALES PARA CADA UNO DE LOS CUATRO TIPOS DE COMPRESORAS (1,000 BHP).-

- 1.- Reciprocante.
- 2.- Centrífuga manejada con motor.
- 3.- Reciprocante.
- 4.- Centrífuga manejada con turbina de gas.

<u>T I P O</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>
Inversión	195,137	190,903	191,066	174,399
Operación y Administración	56,875	37,750	56,875	51,875
Mantenimiento	12,000	7,500	12,000	9,000
Lubricantes	6,000	6,000	6,000	6,000
Combustibles	74,639	126,139	74,639	68,333
Costos Fijos (Amortización)	152,800	149,777	149,604	126,555
Total Anual ...	302,314	327,166	299,118	271,763

El costo por compresora se obtiene con la fórmula del factor de las 6 décimas de Williams y en base al estimado de costo de una compresora, proporcionado por Worthington de México, S. A., y que es el siguiente:

1 Unidad Mainliner - In Line 8 de 2250 HP ...	\$ 4.240,875.00
incluyendo equipo auxiliar y accesorios, tales como sistemas de agua de enfriamiento, etc.	
10% por mano de obra de instalación, así como gastos de ingeniería y administración	<u>\$ 1.274,263.00</u>
Costo total	<u>\$ 5.515,138.00</u>

Para obtener el costo de inversión para una compresora de X BHP de potencia:

$$CINV = 5.515,138 \left(\frac{X \text{ BHP}}{2250} \right)^{0.6}$$

Cálculo del Costo Variable de las Estaciones Compresoras.

Combustible: $\frac{\$185.30}{\text{BHP anual}}$

Lubricantes: $\frac{\$29.46}{\text{BHP anual}}$

Materiales y refacciones: $\frac{\$125.25}{\text{BHP anual}}$

Administración: 5% de $\frac{\text{Costos}}{\text{BHP}}$

$$\frac{\text{Costos}}{\text{BHP}} = 185.30 + 29.46 + 125.25 = \frac{340}{\text{BHP}}$$

$$\frac{\text{Costos variables}}{\text{BHP}} = 340 + .05(340) = \frac{\$357}{\text{BHP}}$$

B). RESULTADOS DEL EJEMPLO DEL CAPITULO IV.-

$f_{10}(t)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_1(t)$	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
$f_2(t)$	19	17	15	13	11	9	9R			
$f_3(t)$	27	24	21	18	17R					
$f_4(t)$	34	30	26	24	24R					
$f_5(t)$	40	35	32	31	30	30R				
$f_6(t)$	45	41	39	37	36	35	35R			
$f_7(t)$	51	48	45	43	41	41R				
$f_8(t)$	58	54	51	48	48R					
$f_9(t)$	64	60	56	55	54	54R				
$f_{10}(t)$	70	65	53	61	60	60R				
$f_{11}(t)$	75	72	69	67	66	65	65R			
$f_{12}(t)$	82	78	75	73	72R					
$f_{13}(t)$	88	84	81	79	78	78R				
$f_{14}(t)$	94	90	87	85	84	84R				
$f_{15}(t)$	100	96	93	91	90	90R				

c). PERFIL DE NIVELES.-

<u>Punto</u>	<u>Distancia</u> <u>Km.</u>	<u>Altura</u> <u>m.</u>
1	0.0	10.0
2	162.0	10.0
3	182.5	3.0
4	187.6	3.0
5	210.6	21.0
6	231.9	5.0
7	240.8	30.0
8	240.9	14.0
9	257.5	55.0
10	304.9	20.0
11	418.7	47.0
12	430.0	31.6
13	435.0	46.9
14	440.0	50.1
15	445.0	60.1
16	450.0	85.8
17	455.0	87.7
18	460.0	101.0
19	480.0	220.4
20	485.0	262.3
21	494.0	368.0
22	520.0	779.2
23	525.0	791.2
24	529.0	1,100.0
25	545.4	1,294.0
26	555.0	1,748.8
27	562.0	2,660.0
28	565.0	2,478.0
29	570.0	2,446.2
30	572.0	2,400.0
31	575.0	2,394.0
32	580.0	2,375.0
33	585.0	2,240.9
34	590.0	2,217.0
35	595.0	2,206.1
36	603.4	2,163.0

<u>Punto</u>	<u>Distancia</u> <u>En.</u>	<u>Altura</u> <u>m.</u>
17	615.0	2,092.3
18	620.0	2,180.7
19	625.0	2,240.1
40	630.0	2,247.0
41	635.0	2,273.9
42	640.0	2,290.5
43	645.0	2,316.1
44	650.0	2,306.9
45	655.0	2,264.8
46	660.0	2,235.4
47	667.0	2,210.0
48	670.0	2,167.8
49	675.0	2,185.8
50	685.0	2,203.3
51	690.0	2,220.3
52	707.0	2,360.0
53	708.0	2,300.0
54	709.0	2,380.0
55	710.0	2,362.6
56	722.0	2,900.0
57	725.0	2,800.0
58	730.0	2,853.9
59	735.0	2,742.2
60	740.0	2,661.9
61	741.0	2,720.0
62	742.5	2,640.0
63	745.0	2,754.0
64	748.0	2,910.0
65	755.0	2,612.9
66	760.0	2,345.2
67	763.0	2,300.0
68	765.0	2,371.0
69	770.0	2,254.5
70	775.0	2,246.5
71	780.0	2,246.7
72	780.4	2,242.0

0). COSTOS DE INSTALACION DE TUBERIA.-

Datos proporcionados por el Departamento de Precios Unitarios, Gerencia de Proyectos y Construcción.

<u>Diámetro</u> <u>mm.</u>	<u>\$/Km.</u>
18	133,877.00
20	148,471.00
24	182,614.00
30	249,100.00
34	301,420.00
36	327,850.00

Estos costos incluyen:

- 1.- Apertura de la brecha, conformación y conservación del derecho de vía, caminos de acceso y acondicionamiento de áreas de almacenamiento.
- 2.- Excavación de zanja.
- 3.- Transporte de la tubería, incluyendo maniobras de carga,

descarga y tendido a lo largo de la cepa.

- 4.- Manejo, almacenamiento y distribución de los materiales anticorrosivos, válvulas y conexiones.
- 5.- Rebiselado, doblado, alineado y soldado de la tubería.
- 6.- Limpieza, imprimación y recubrimiento anticorrosivo de la tubería.
- 7.- Detectado, parches, bajado de la tubería y tapado de la ranja.
- 8.- Limpieza interior y prueba hidrostática.
- 9.- Limpieza final del derecho de vía.

e). COSTOS DE TUBERIAS. -

Proporcionados por el Departamento de Precios Unitarios.

Gerencia de Proyectos y Construcción.

Diámetro in.	Espesor	Costo - \$/m		
		Grado "B"	X-42	X-52
18	0.2500	310.60	328.90	357.10
	0.2812	345.60	364.90	396.30
	0.3125	370.40	390.30	426.00
	0.3437	405.40	427.85	465.10
	0.3750	438.90	464.00	504.30
	0.4375	508.95	537.50	584.20
	0.5000	580.50	612.60	665.60
20	0.2500	347.10	366.40	397.90
	0.2812	385.00	406.85	441.70
	0.3125	417.00	439.95	481.20
	0.3437	456.40	483.45	524.60
	0.3750	495.70	522.50	568.55
	0.4375	568.60	600.50	651.50
	0.5000	646.00	683.05	742.40
24	0.2500	430.10	454.95	493.30
	0.2812	476.80	502.90	546.65
	0.3125	511.80	540.45	587.25
	0.3437	560.00	591.60	643.70
	0.3750	609.50	642.60	700.10
	0.4375	702.80	741.70	806.50
	0.5000	800.55	848.20	922.50
30	0.2812	611.00	645.50	698.90
	0.3125	656.10	692.10	751.70
	0.3437	717.40	756.70	822.15
	0.3750	778.70	821.20	892.60
	0.4375	898.15	947.30	1,028.90
	0.5000	1,022.10	1,077.95	1,171.45

Costos de Tuberías

2-E

<u>Diámetro</u> <u>in.</u>	<u>Resistenz</u>	<u>Grado "B"</u>	<u>X-42</u>	<u>X-52</u>
34	0.1125	748.05	789.65	856.65
	0.1437	819.45	861.20	938.15
	0.1750	889.40	938.25	1,017.90
	0.4175	1,030.85	1,087.00	1,180.90
	0.5000	1,179.70	1,238.50	1,343.75
36	0.1125	828.65	875.00	950.05
	0.1437	905.70	921.85	1,037.75
	0.1750	982.80	1,036.95	1,123.20
	0.4175	1,138.60	1,200.40	1,300.95
	0.5000	1,297.35	1,368.45	1,481.20

El importe total incluye:

- a). Importe de la tubería.
- b). Importe de los materiales anticorrosivos.
- c). Importe de válvulas y piezas especiales.
- d). Importe de los fletes de la tubería, materiales anticorrosivos y piezas especiales.
- e). Importe por inspección radiográfica.
- f). Importe por protección catódica.

10. CANTIDAD DE GAS INSTALADA TRANSMISION
EN LOS CLIENTES INDUSTRIALES.

Cantidad Total.

Cantidad en Instalaciones de prueba.

Por No de Clientes Industriales.

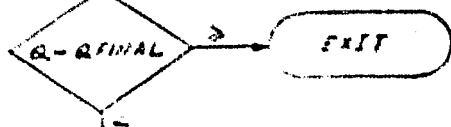
5. ALGORITMA DAN FLOW CHART PROGRAM

DATA: TCRAB, CS, CG, TG, RC, RT, CT, CA,
 CD, CE, FRC, FRCI, CH, IN, CFI, CFI2, FI,
 S, FFI, HAN, ARI, I, AM, D, SP, RA, SS, H,
 PC, A, M, G, S, G, A, L

$CI = \left(455.07 \left(\frac{CS}{CS} \right)^{1.07117} \right)^{1.137}$
 $CF = \frac{CI (CF)^{1.8739}}{2.08137}$
 CFF = TCRAB * TCRAB * FRC
 CFI = TCRAB * FRC
 INC = 0
 CFI = 1

Q = Q + 1

Q = Q + 35.72

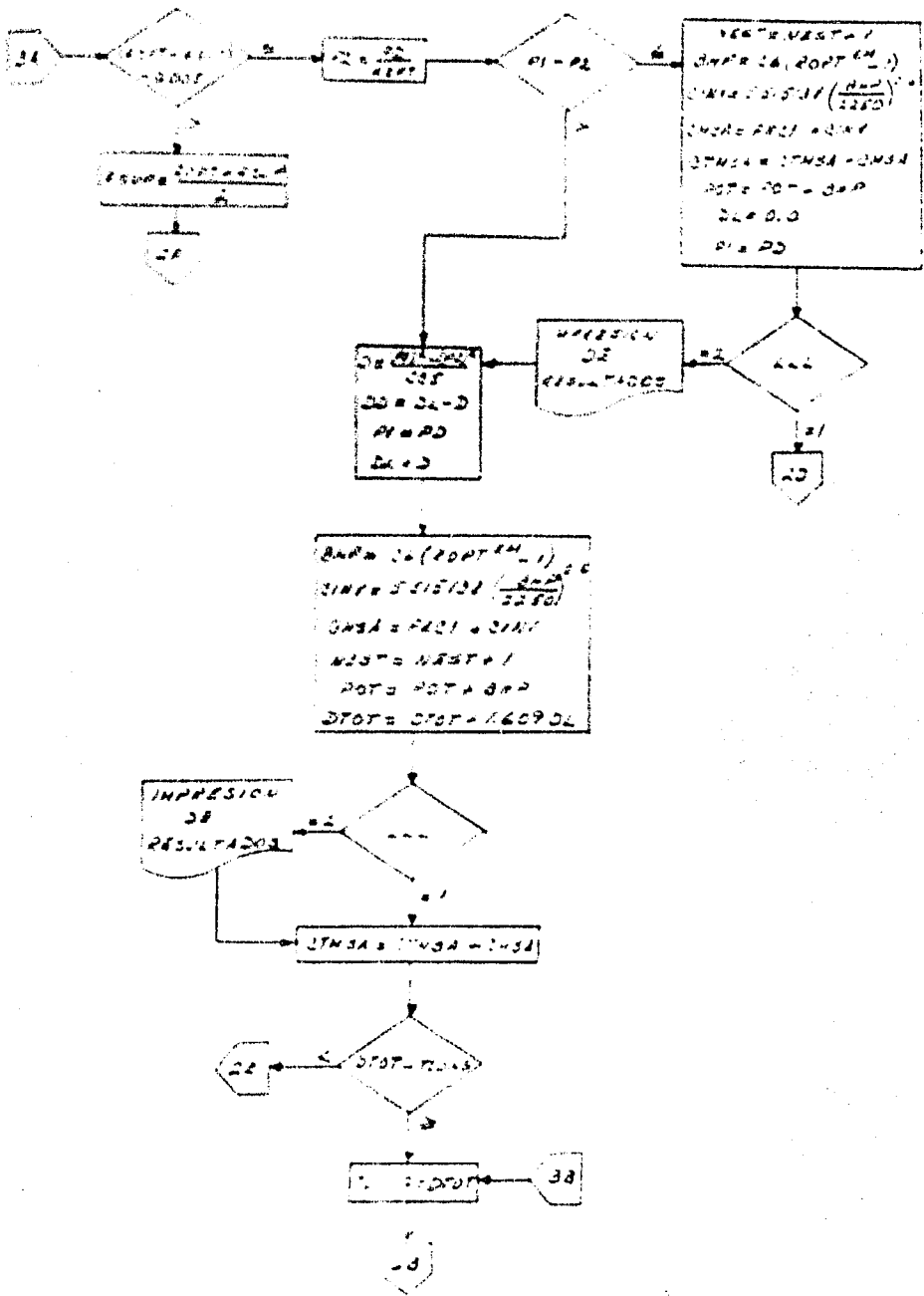


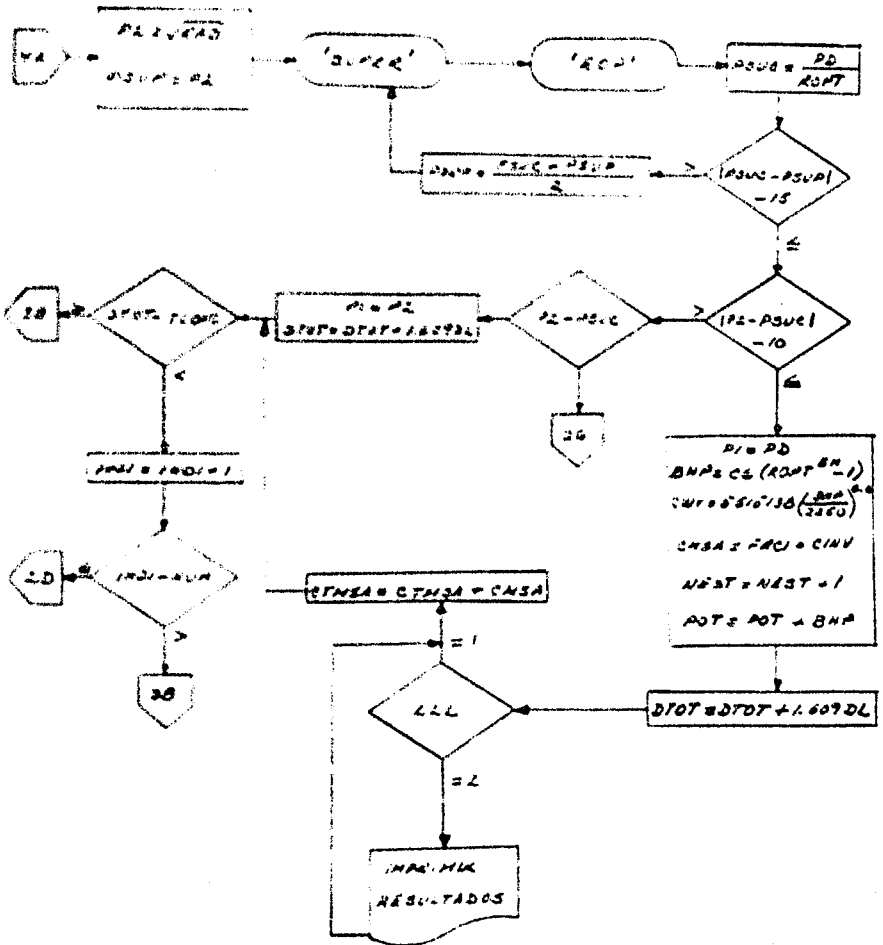
CG = 20 / Q = 20
 CQ = Q * 10
 CQE = CQ * 100
 C4 = 2 * CQ * 50
 TG = 20
 $CA = \frac{CQE + 50 * 1.137}{C1} \quad TG = 20$

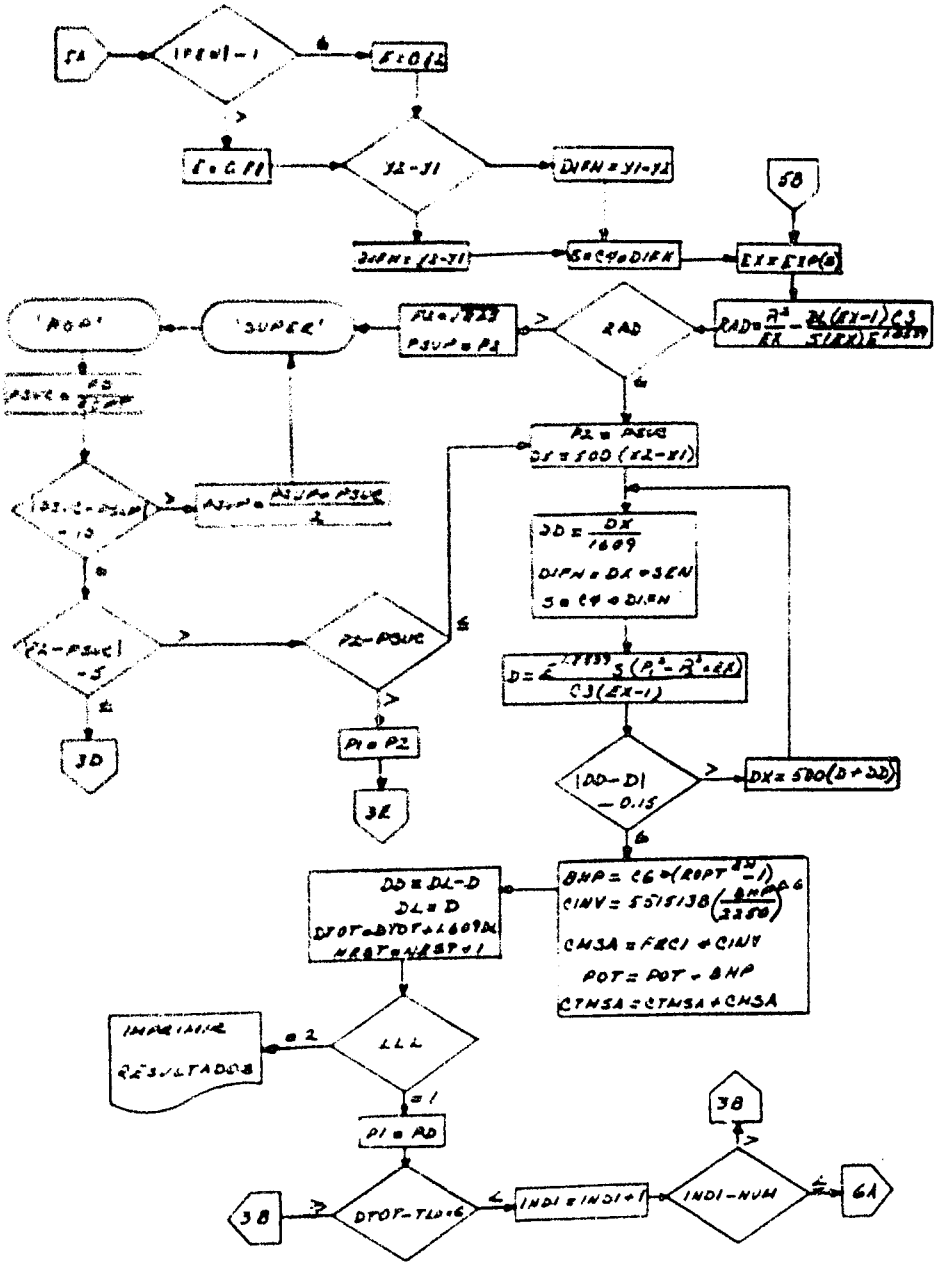
MIA = 0
 MIA = 30 * ...

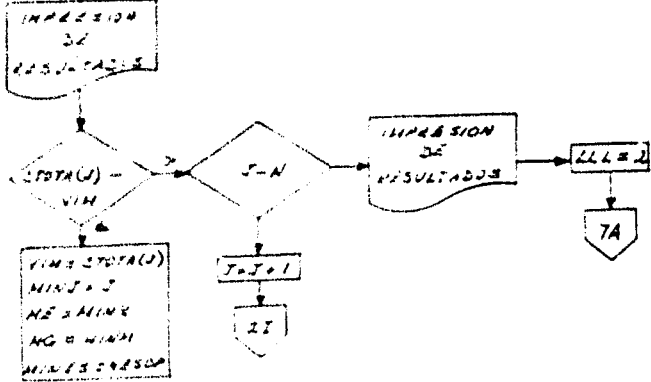
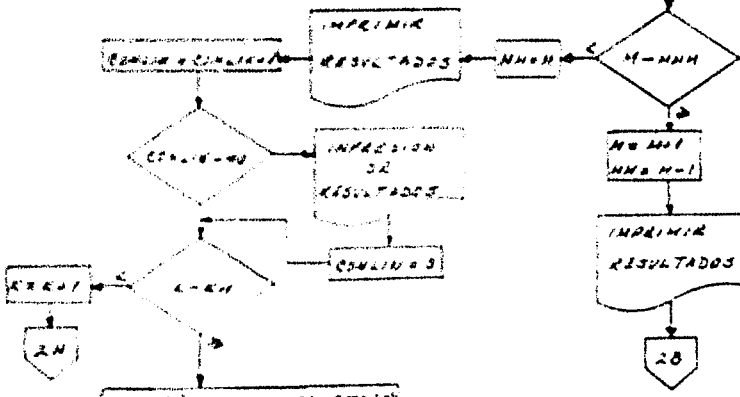
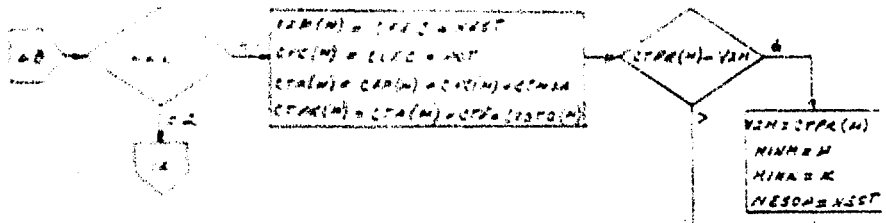
IMPRESSION

2A









7A

$$DIAM = 2 \cdot AM(MIN) - 2 \cdot ESP(x)$$

$$DIE = DIAM$$

$$L3 = \frac{L2}{DIE}$$

$$L5 = \frac{L4E}{CE+L2}$$

$$DVAR = \frac{2 \cdot ESP(ME) + ESP(MG)}{DIAM(MIN)}$$

TRIP MIA
ENCARRIDOS

2C

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBROUTINA 'ROP'

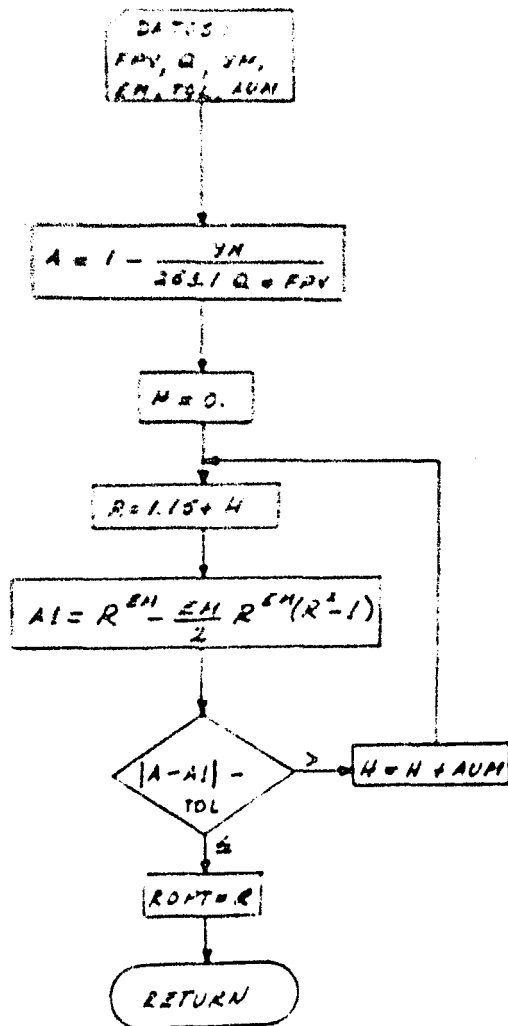
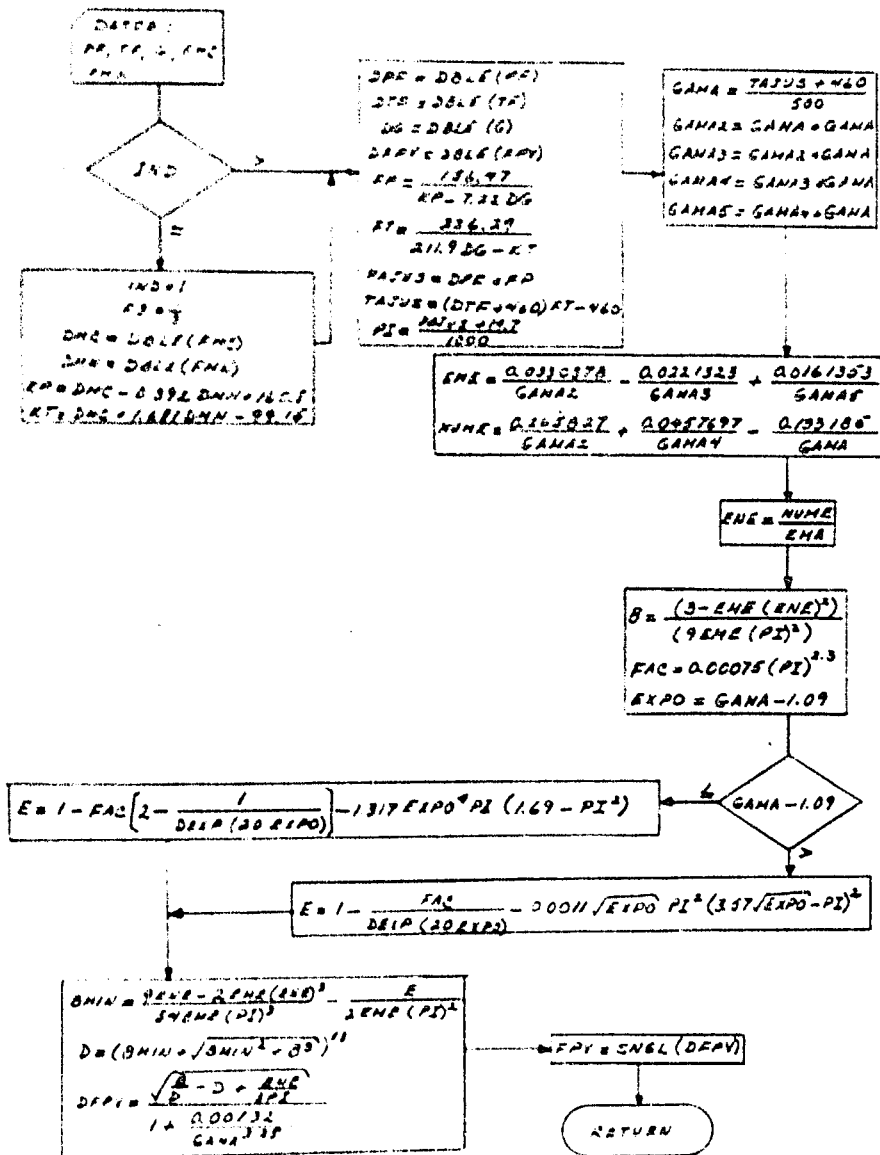


DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBROUTINA 'SUPER'



C**** V100 * VALOR MAXIMO DE MINIMO COSTO
 C**** V101 * VALOR MAXIMO DE MINIMO COSTO
 C**** V102 * VALOR DE GRADOS
 C**** V103 * VALOR DE DIAMETROS QUE SE PRELEAN
 C**** V104 * VALOR DELACELADOR DEL NÚMERO DE ESTACIONES
 C**** V105 * VALOR DEL NÚMERO DE PUNTOS DEL PERFIL DE NIVELES
 C**** P1 * PRESION INICIAL DE UN TRAMO
 C**** P2 * PRESION FINAL DE UN TRAMO
 C**** P3 * PRESION DE DESCARGA PISA
 C**** P4 * PRESION
 C**** P5 * PRESION INICIAL EN EL GASODUCTO
 C**** P6 * PRESION MAXIMA ADMISIBLE PISA
 C**** P7 * POTENCIA TOTAL
 C**** P8 * PRESION STANDARD
 C**** P9 * PRESION DE SECCION
 C**** P10 * PRESION SUPLESTA
 C**** P11 * VALOR DE MILLANTES DE PIES CURVICOS POR DIA
 C**** P12 * VALOR DE GASO FINAL
 C**** P13 * VALOR DE GASO INICIAL
 C**** P14 * VALOR DE MILLANTES DE PIES CURVICOS POR DIA
 C**** P15 * VALOR DE COMPRESION
 C**** P16 * VALOR DE LA FÓRMULA DE RAYHANDLE
 C**** P17 * VALOR DE COMPRESION OPTIMA
 C**** P18 * VALOR DE TIF
 C**** P19 * VALOR DEL ANILLO
 C**** P20 * VALOR DE COEFICIENTE
 C**** P21 * TEMPERATURA DEL GAS GRADOS FARENHEIT
 C**** P22 * TEMPERATURA DEL GAS GRADOS RANKINE
 C**** P23 * VALOR DE LONGITUD TOTAL GASODUCTO
 C**** P24 * TOLERANCIA DE ERROR
 C**** P25 * TEMPERATURA STANDARD GRADOS RANKINE
 C**** V200 * VALOR DELACELADOR DE MINIMO COSTO
 C**** V201 * VALOR DELACELADOR DE MINIMO COSTO
 C**** V202 * VALOR DELACELADOR DE MINIMO COSTO
 C**** V203 * VALOR DELACELADOR DE MINIMO COSTO
 C**** V204 * VALOR DE LAS ANSCISAS DE LOS PUNTOS EXTREMOS DE CADA TRAMO
 C**** V205 * VALOR DE LAS ANSCISAS DE LOS PUNTOS EXTREMOS DE CADA TRAMO
 C**** V206 * VALOR DE LA RELACION DE MEDIO COSTOS FIJOS/COSTOS VARIABLES
 C**** V207 * VALOR DE LA CONFIABILIDAD
 11000011 4100791256
 09000021 4100791256
 09000021 4100791256

LE TUA DE DATOS.

11000011 4100791256
 09000021 4100791256
 09000021 4100791256
 11000011 4100791256
 09000021 4100791256
 09000021 4100791256
 11000011 4100791256
 09000021 4100791256
 09000021 4100791256
 11000011 4100791256
 09000021 4100791256
 09000021 4100791256

11000011 4100791256
 09000021 4100791256
 09000021 4100791256
 11000011 4100791256

1100
1110
C
C CON LAS SIGUIENTES DOS INSTRUCCIONES SE PUEDE OBTENER
C

1120
1130
1140
1150

C
C CALCULO DE CONSTANTES.

907
1000
1010
1020
1030
1040
1050
1060
1070

C
C IMPRESION DE ENCABEZADOS.

1170
1180
1190
1200
1210
1220
1230
1240
1250
1260
1270
1280
1290
1300
1310
1320
1330
1340
1350
1360
1370
1380
1390
1400

C
C LECTURA DE COSTOS.

1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1297
1298
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1400

C
C CALCULO DEL DIAMETRO INTERIOR.

C
C DIAMETRO DIAMETRO ESPESOR

C
C CALCULO DE CONSTANTES.

1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1297
1298
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1400

C
C CALCULO DE LA PRESION MAXIMA PERMISIBLE EN LA TUBERIA.

1200
1210
1220
1230
1240
1250
1260
1270
1280
1290
1300
1310
1320
1330
1340
1350
1360
1370
1380
1390
1400

C
C CALCULO DE LA PRESION DE DESCARGA DE LAS COMPRESORAS.

1205
1215
1225
1235
1245
1255
1265
1275
1285
1295
1305
1315
1325
1335
1345
1355
1365
1375
1385
1395
1405

```

TESTO
DPTO.
PROYECTO.
IMPORTE.
CENTRO.
FACIL.
FINC.

```

```

C
C
C   LAS SIGUIENTES INSTRUCCIONES INCLUYENDO HASTA LA 2600 SIRVEN PARA
C   CALCULAR EL NUMERO DE ESTACIONES PARA EL GASODUCTO.
C

```

```

1100  I=0
1200  I=I+1
1300  IF (I.NE.1) GO TO 1400
1400  CALL SUPRIM (I, X, Y, Z, W, V, U, T, S, R, Q, P, O, N, M, L, K, J, I)
1500  IF (I.EQ.1) GO TO 1600
1600  CALL SUPRIM (I, X, Y, Z, W, V, U, T, S, R, Q, P, O, N, M, L, K, J, I)
1700  IF (I.EQ.2) GO TO 1800
1800  CALL SUPRIM (I, X, Y, Z, W, V, U, T, S, R, Q, P, O, N, M, L, K, J, I)
1900  IF (I.EQ.3) GO TO 2000
2000  CALL SUPRIM (I, X, Y, Z, W, V, U, T, S, R, Q, P, O, N, M, L, K, J, I)
2100  IF (I.EQ.4) GO TO 2200
2200  CALL SUPRIM (I, X, Y, Z, W, V, U, T, S, R, Q, P, O, N, M, L, K, J, I)
2300  IF (I.EQ.5) GO TO 2400
2400  CALL SUPRIM (I, X, Y, Z, W, V, U, T, S, R, Q, P, O, N, M, L, K, J, I)
2500  IF (I.EQ.6) GO TO 2600
2600  CALL SUPRIM (I, X, Y, Z, W, V, U, T, S, R, Q, P, O, N, M, L, K, J, I)

```

```

C
C
C   CALCULO DE LA PRESION DE SUCCION POR MEDIO DE LA FORMULA DE PANHANDLE.
C

```

```

1500  P=0.0
1600  P=P+0.1
1700  P=P+0.1
1800  P=P+0.1
1900  P=P+0.1

```

```

C
C
C   LLAMADA DE LA SUBROUTINA PARA CALCULAR EL FACTOR DE SUPERCOMPRESIBILIDAD.
C

```

```

CALL SUPER (P, T, Z, W, V, U, T, S, R, Q, P, O, N, M, L, K, J, I)

```

```

C
C
C   LLAMADA DE LA SUBROUTINA PARA CALCULAR LA RELACION DE COMPRESION OPTIMA.
C

```

```

CALL OPT (P, T, Z, W, V, U, T, S, R, Q, P, O, N, M, L, K, J, I)
1700  P=P+0.1
1800  P=P+0.1
1900  P=P+0.1
2000  P=P+0.1

```

```

C
C
C   CALCULO DE LA POTENCIA.
C

```

```

CALL POT (P, T, Z, W, V, U, T, S, R, Q, P, O, N, M, L, K, J, I)

```

```

C
C
C   CALCULO DEL COSTO DE INVERSION DE LA ESTACION COMPRESORA.
C

```

```

1500  P=0.0
1600  P=P+0.1
1700  P=P+0.1
1800  P=P+0.1
1900  P=P+0.1
2000  P=P+0.1
2100  P=P+0.1
2200  P=P+0.1
2300  P=P+0.1
2400  P=P+0.1
2500  P=P+0.1
2600  P=P+0.1

```

1054- ESTACION COMPRESORA BARRANCO

CALCULO DE LA LONGITUD DE LA TUBA POR MEDIO DE LA ECUACION DE PANNAYOLE

1057- CALCULO DE LA LONGITUD DE LA TUBA

1058- $L = \frac{P_1 - P_2}{K}$

CALCULO DE LA POTENCIA

1060- $P = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta}$

CALCULO DEL COSTO DE INVERSION DE LA ESTACION COMPRESORA.

1061- $C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$

CALCULO DEL COSTO ANUAL POR MANTENIMIENTO SEGUROS Y AMORTIZACION DE LA ESTACION COMPRESORA.

CALCULO DE LA INVERSION

1062- $C_1 = C_1 \cdot F_1$

1063- $C_2 = C_2 \cdot F_2$

1064- $C_3 = C_3 \cdot F_3$

1065- $C_4 = C_4 \cdot F_4$

1066- ESTACION COMPRESORA BARRANCO

1067- ESTACION COMPRESORA

1068- $C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$

1069- $C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$

1070- $C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$

1071- $C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$

1072- $C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$

ELABORACION DE LA SUBROUTINA PARA CALCULAR EL FACTOR DE SUPERCOMPRESIBILIDAD.

1073- CALCULO DEL FACTOR DE SUPERCOMPRESIBILIDAD

ELABORACION DE LA SUBROUTINA PARA CALCULAR LA RELACION DE COMPRESION OPTIMA.

CALCULO DEL FACTOR DE SUPERCOMPRESIBILIDAD

1074- $PSUC = \frac{P_1 - P_2}{K}$

1075- $PSUC = \frac{P_1 - P_2}{K}$

1076- $PSUC = \frac{P_1 - P_2}{K}$

1077- $PSUC = \frac{P_1 - P_2}{K}$

1078- $PSUC = \frac{P_1 - P_2}{K}$

1079- $PSUC = \frac{P_1 - P_2}{K}$

CALCULO DE LA POTENCIA.

1080- $P = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta}$

CALCULO DEL COSTO DE INVERSION DE LA ESTACION COMPRESORA.

1081- $C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$

CALCULO DEL COSTO ANUAL POR MANTENIMIENTO SEGUROS Y AMORTIZACION DE LA ESTACION COMPRESORA.

CALCULO DE LA INVERSION

1082- $C_1 = C_1 \cdot F_1$

1083- $C_2 = C_2 \cdot F_2$

1084- $C_3 = C_3 \cdot F_3$

1085- $C_4 = C_4 \cdot F_4$

2150 GO TO 2752, 2753, 2754
2160 IF (P1/P2) .GT. 100 THEN P=0, P=0
2170 C=34-C*(P5A+C*P5A)
2180 IF (P2/P1) .GT. 100 THEN P=0, P=0
2190 P1=P2
2200 IF (P2/P1) .GT. 100 THEN P=0, P=0
2210 IF (P2/P1) .GT. 100 THEN P=0, P=0
2220 IF (P2/P1) .GT. 100 THEN P=0, P=0
2230 GO TO 2400
2240 P=0
2250 IF (ABS(P2/P1)-1) .GT. 100 THEN P=0, P=0
2260 P=0
2270 GO TO 2400
2280 P=0
2290 IF (P2/P1) .GT. 100 THEN P=0, P=0
2300 DIFF=2-Y1
2310 GO TO 2400
2320 DIFF=1-Y1
2330 S=C*(DIFF)
2340 EX=EXP(S)

C
C CALCULO DE LA PRESION DE SUCCION POR MEDIO DE LA ECUACION CORREGIDA DE
C RAYHANDELE.

2400 P1=P1*EX*EQL*(EA-1)*(C3)/15*EX*E**1.85391
2410 IF (ABS(P2/P1)-1) .GT. 100 THEN P=0
2420 P2=P1*EQL
2430 P=0

C
C LLAMADA DE LA SUBROUTINA PARA CALCULAR EL FACTOR DE SUPERCOMPRESIBILIDAD.
C
2440 CALL SUPERPR(S, P, P50, P5C, P5N, P5W)

C
C LLAMADA DE LA SUBROUTINA PARA CALCULAR LA RELACION DE COMPRESION OPTIMA.
C
CALL YOP(P5W, P5N, P5C, P50, EQL, P5M, RPR1)

2450 P5UC=P50/P5OP
2460 IF (ABS(P5UC-P5UR)-1) .GT. 100 THEN P5UC=P5UC*1.5
2470 P5UC=P5UC*1.5
2480 GO TO 2700

2490 IF (ABS(P2/P5UC)-1) .GT. 100 THEN P=0

2500 IF (P2/P5UC) .GT. 100 THEN P=0

2510 P1=P2

2520 GO TO 2700

2530 P=P5UC

2540 DIFF=1-Y1

2550 GO TO 2700

2560 DIFF=1-Y1

2570 S=C*(DIFF)

2580 EX=EXP(S)

2590 S=C*(DIFF)

2600 EX=EXP(S)

2610 S=C*(DIFF)

2620 EX=EXP(S)

2630 S=C*(DIFF)

2640 EX=EXP(S)

2650 S=C*(DIFF)

2660 EX=EXP(S)

2670 S=C*(DIFF)

2680 EX=EXP(S)

```

13  CALCULO DEL COSTO DE INVERSIÓN DE LA ESTACION COMPRESORA.
14  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
15
16  CALCULO DEL COSTO ANUAL POR MANTENIMIENTO, SEGUROS Y AMORTIZACIÓN DE
17  LA ESTACION COMPRESORA.
18
19  COSTO=K*COEFICIENTE
20  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
21  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
22  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
23  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
24  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
25  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
26  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
27  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
28  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
29  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
30  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
31  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
32  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
33  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
34  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
35  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
36  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
37  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
38  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
39  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
40  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
41  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
42  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
43  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
44  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
45  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
46  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
47  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
48  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
49  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
50  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
51  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
52  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
53  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
54  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
55  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
56  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
57  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
58  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
59  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
60  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
61  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
62  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
63  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
64  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
65  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
66  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
67  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
68  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
69  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
70  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
71  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
72  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
73  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
74  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
75  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
76  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
77  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
78  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
79  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
80  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
81  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
82  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
83  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
84  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
85  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
86  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
87  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
88  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
89  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
90  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
91  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
92  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
93  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
94  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
95  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
96  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
97  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
98  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
99  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6
100  COSTO=0.15137*(100000/2250.1440.6

```


1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1097
1098
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1297
1298
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1400
1401
1402
1403
1404
1405
1406
1407
1408
1409
1410
1411
1412
1413
1414
1415
1416
1417
1418
1419
1420
1421
1422
1423
1424
1425
1426
1427
1428
1429
1430
1431
1432
1433
1434
1435
1436
1437
1438
1439
1440
1441
1442
1443
1444
1445
1446
1447
1448
1449
1450
1451
1452
1453
1454
1455
1456
1457
1458
1459
1460
1461
1462
1463
1464
1465
1466
1467
1468
1469
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483
1484
1485
1486
1487
1488
1489
1490
1491
1492
1493
1494
1495
1496
1497
1498
1499
1500

1000
1001