



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA TUTORIAL
APLICADO A CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE TRANSPORTE DE
HIDROCARBUROS A TRAVÉS DE TUBERÍA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A N :

HÉCTOR NAVARRETE VELASCO

OSWALDO ESPÍNOLA GONZÁLEZ



DIRECTOR: ING. CARLOS J. LIRA SIL

MÉXICO, D. F., CIUDAD UNIVERSITARIA, 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



ORGANISMO NACIONAL
AZÚCAR
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-1217

SR. HECTOR NAVARRETE VELASCO
Presente

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

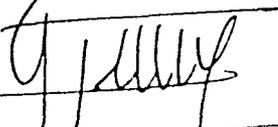
**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA TUTORIAL APLICADO A CONCEPTOS
BASICOS SOBRE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS A TRAVES DE TUBERIA**

- I INTRODUCCION
- II CONCEPTOS GENERALES
- III CONCEPTOS TEORICOS DE FLUJO DE FLUIDOS A TRAVES DE TUBERIA
- IV TECNICAS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA TUTORIAL
- V DESARROLLO DEL SISTEMA TUTORIAL
- VI MANUAL DEL USUARIO
- VII CONCLUSIONES
- VIII BIBLIOGRAFIA

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 24 de septiembre de 2001
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg
ff



INSTITUTO NACIONAL
AZÚCAR DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-1218

SR. OSWALDO ESPINOLA GONZALEZ
Presente

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

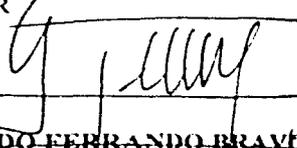
DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA TUTORIAL APLICADO A CONCEPTOS BASICOS SOBRE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS A TRAVES DE TUBERIA

- INTRODUCCION
- I CONCEPTOS GENERALES
- II CONCEPTOS TEORICOS DE FLUJO DE FLUIDOS A TRAVES DE TUBERIA
- III TECNICAS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA TUTORIAL
- IV DESARROLLO DEL SISTEMA TUTORIAL
- V MANUAL DEL USUARIO
- CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 24 de septiembre de 2001
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg
P

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS:

**"DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA TUTORIAL
APLICADO A CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE TRANSPORTE
DE HIDROCARBUROS A TRAVÉS DE TUBERÍA"**

PRESENTADA POR: **HÉCTOR NAVARRETE VELASCO** 9038728-9
OSWALDO ESPÍNOLA GONZÁLEZ 9133875-8

JURADO:

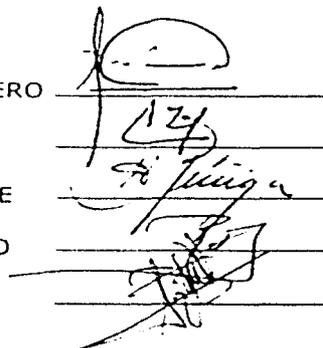
PRESIDENTE: M. I. NESTOR MARTÍNEZ ROMERO

VOCAL: ING. CARLOS JAVIER LIRA SIL

SECRETARIO: ING. HORACIO ZÚÑIGA PUENTE

1^{er} SUPLENTE: DR. RAFAEL RODRÍGUEZ NIETO

2^{do} SUPLENTE: M. I. JOSÉ MARTÍNEZ PÉREZ



Handwritten signatures of the jury members over horizontal lines.

Marzo de 2002

Agradecimientos

A todas y cada una de las personas quienes con su experiencia, conocimiento, apoyo y amistad hicieron posible nuestra conclusión de la carrera. En especial al M. I. Néstor Martínez Romero (Padrino de generación). Gracias Ingenieros.

Al Ing. Carlos J. Lira Sil, especialmente, por aceptar la dirección y colaborar directamente con nosotros, en el desarrollo de este trabajo de tesis, gracias además, por los consejos y observaciones, por contribuir a nuestra formación profesional, por brindarnos su conocimiento y su tiempo.

A todos aquellos que colaboraron en la elaboración de este trabajo de investigación con: información, material, equipo y sobre todo por la atención prestada. Gracias.

Agradecemos también al grupo de sinodales (M. I. Néstor Martínez R., Ing. Horacio Zúñiga P., Dr. Rafael Rodríguez N. y M. I. José Martínez P.), quienes aportaron sus valiosas observaciones y sugerencias, enriqueciendo la investigación y diseño de este trabajo.

A todos nuestros compañeros y amigos con los que compartimos momentos difíciles, especiales y divertidos a lo largo de la carrera, hasta pronto.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, pero sobre todo a la Facultad de Ingeniería, por habernos brindado cobijo en sus instalaciones durante todo este proceso de formación; esperamos algún día poder retribuir todo lo que la universidad ha hecho por nosotros.

Héctor Navarrete Velasco

Oswaldo Espínola González

Mi primer agradecimiento es a ese alguien o algo que nunca he visto, pero que siempre lo he sentido junto a mí; al que sólo lo puedo llamar *DIOS*, gracias.

A mis padres, Héctor Navarrete Licea y M^a. Elena Velasco Mendoza; gracias mamá por darme la vida y hacerme un hombre de principios y moral, gracias papá por enseñarme a NO caminar con la cabeza baja y por NO ver por encima de mi hombro, espero haber aprendido bien la lección de tratar a la gente como gente, y también espero se sientan orgullosos de mí, que yo haré lo propio por ser mejor y digno de ustedes, gracias, los quiero.

A mis hermanos, Osvaldo y Jenifer, gracias por aguantarme y apoyarme en mis malos ratos, sigan adelante vean que los sueños si se cumplen, hoy se cumplió el mío y estén seguros que haré lo posible por ayudarles en cumplir los suyos, no claudiquen.

A mis familias, Navarrete y Velasco, a mis Abuelas *Gregoria* ^(†) y *Dolores* ^(†), estoy convencido de que se fueron seguras de que conseguiría este logro, *descansen en paz*, a mi Abuelo Juvencio, a mis tíos y primos de ambas familias, por esos buenos ratos de mi infancia y por que nunca dejaron de echarme porras, una sincera disculpa por aquellos malos ratos y gracias por todo.

Antes de agradecer a estas personas primero tengo que agradecerle a La Vida por haberlos puesto en mi camino, si locos es a ustedes: Emmanuel, Yeisuan, Luis, Berna, Fran, Salva, Cua, y por supuesto a sus respectivas familias (Sres. Gloria y Manuel Álvarez, Sra. Elvia Torres, Sr. Tacho Montiel, Sres. Palacios Cruz) que me hicieron sentir como un integrante más de ellas, gracias; como bien saben, tal vez me sea de ahora en adelante muy difícil verlos pero tengo la completa seguridad de que estarán ahí cuando los necesite, gracias por ser como son.

Al Ing. Víctor D. Pinilla por ser antes que mi profesor un gran amigo, a todos los amigos de la U. A. C. T., del Departamento de Edición de la F. I. , a todos y cada uno de los integrantes del VMO, lo mejor para ustedes; gracias Claudia por la ayuda que siempre recibí de ti, a mis compañeros de carrera Rodolfo y compañía, Manrique y demás brothers, Mikel y compañía, a aquellos compañeritos del club de la ficha: Cesar, Frankie, Chaparro, Oax, Arian, Doc. (Alejandra), Mike, etc., son la neta.

A todos y cada uno de mis profesores de la carrera, gracias por transmitirme parte de su experiencia en sus clases.

A Oswaldo mi amigo y compañero de Tesis, por sacar este proyecto adelante y haber cruzado la meta juntos.

Gracias a todos.

Héctor



Quiero dedicar este trabajo con mucho cariño a todos y cada uno de los integrantes de mi familia, por apoyarme y contribuir a lograr esta gran meta que se ha cumplido, gracias a todos ustedes.

Con especial atención y admiración a mi madre la Profra. Briseida González Ayala, que ha base de sacrificios, dedicación y amor me mantuvo siempre en el camino de la sabiduría, se esforzó por darme todas las oportunidades para lograr finalizar mi carrera, me dio educación y me heredo el compromiso de ser cada día mejor.

A mi abuelita, Profra. Elodia Ayala Galván, que sin su apoyo y dedicación no hubiera sido posible concluir mi carrera, además por compartir su vida conmigo, darme consejos y ser la persona más tierna del mundo. *Gracias Boli.*

A mi tía más querida Profra. Guadalupe González Ayala, que gracias a su apoyo, amor y comprensión me inculco el espíritu de superación y fue mi ejemplo a seguir, además por compartir momentos tan importantes para mí a lo largo de mi vida.

A mis hermanos y primos Lalo, Irais y Nareni, que me impulsaron a llegar, gracias por compartir sus experiencias, conocimientos, consejos y sobre todo el amor que recibo de ustedes día con día.

A mi mejor amigo Lic. Russell Cabrera González, por apoyarme en cada una de las etapas de mi carrera; por tu aportación, colaboración y por compartir tu conocimiento y experiencia en este trabajo de Tesis, por la amistad incondicional que me has brindado en todo este tiempo, por ser el mejor amigo del mundo.

A mis amigos Ríos, Cesar, Lorena, Silvia, Néstor, Erik, Héctor y Dafne, gracias por soportarme en situaciones difíciles, por compartir momentos súper importantes en mi vida, por su ayuda y amistad que me han brindado.

Oswaldo Espínola González.



INTRODUCCIÓN.

CAPÍTULO I. 1 Conceptos generales.

- o Transporte de hidrocarburos. 2
- o Los inicios del transporte de hidrocarburos de México. 2
- o Importancia del transporte de hidrocarburos por ductos. 4
- o El Sistema de Información Geográfica de Derechos de Vía e Instalaciones (Sigedi). 5
- o Propiedades PVT. 9
- o Correlaciones PVT. 11

CAPÍTULO II. 20 Conceptos teóricos de flujo de fluidos a través de tuberías.

- o Fundamentos de flujo a través de tuberías. 21
 - Ecuación general de energía. 21
 - Pérdidas de presión por fricción. 24
 - Ecuación de Darcy. 24
 - Ecuación de Fanning. 25
 - Factor de fricción. 25
 - Rugosidad. 26
- o Flujo de líquidos por tubería. 29
 - Ecuación general en unidades prácticas. 29
 - Número de Reynolds. 30
 - Eficiencia de flujo. 31
 - Aplicación de la ecuación de flujo en el análisis y diseño de tuberías que conducen líquidos. 32
 - Diseño de tuberías. 34
 - Predicción del comportamiento de pozos inyectores de agua. 35
 - Pérdidas por fricción en las conexiones. 41
- o Flujo de gas por tuberías y estranguladores. 43
 - Ecuación general de energía en unidades prácticas. 43
 - Número de Reynolds. 47
 - Flujo de gas por conductos anulares. 48
 - Número de Reynolds en conductos anulares. 49
 - Aspectos a considerar en la aplicación de la ecuación general de energía. 49
 - El factor de fricción. 49
 - El nivel base. 50
 - Método de solución para las ecuaciones de flujo. 51
 - La presión media. 51
 - Eficiencia de flujo. 51
 - Sistemas complejos de transporte y recolección. 52
 - Tuberías en serie. 52
 - Tuberías en paralelo. 53

• Presencia de Condensados.	55
• Erosión de tuberías.	56
• Descarga de líquidos.	58
• Flujo de gas a través de estranguladores.	60
• Principios teóricos.	61
• Desarrollo del fenómeno.	64
• Diámetro de estrangulador.	65
o Flujo multifásico en tuberías.	68
• Patrones de flujo.	68
• Colgamiento.	68
• Velocidades superficiales.	70
• Velocidad real.	71
• Densidad de la mezcla de los fluidos.	71
• Gasto de masa.	73
• Viscosidad de la mezcla.	73
• Viscosidad de una emulsión.	75
• Tensión superficial de la mezcla de líquidos.	76
• Densidad de la mezcla de líquidos.	76
o Flujo multifásico en tuberías horizontales.	76
• Aspectos generales.	76
• Cálculo de la caída de presión en tuberías horizontales.	78
• Procedimiento general de cálculo.	80
• Cálculo del colgamiento de líquido en tubería horizontal transportadora de gas húmedo.	82
• Transporte de gas húmedo.	83
• Correlación general.	83
• Correlación de Beggs y Brill.	84
• Procedimiento de cálculo.	87
• Correlación de Dukler.	88
• Procedimiento de cálculo.	90

CAPÍTULO III. 94

Técnicas para el diseño de un sistema tutorial.

o Aspectos generales.	95
o Los métodos computacionales y el conocimiento.	95
o Aprendizaje, enseñanza e instrucción.	96
o Formas del aprendizaje asistido por computadora	99
o Diseño de material educativo computarizado.	102
o La visión enfocada al aprendizaje asistido por computadora.	103
• El autor y el maestro.	103
• ¿Qué es un Tutorial?.	107
• Los lenguajes y sistemas de autor.	114
o Planeación de una lección computarizada.	117
• El objetivo.	118
• El auditorio y los usuarios.	118
• El tiempo.	119
• Recursos.	120
• Selección de instrumentos y lenguaje.	121
• Curso, lecciones, marcos y unidades.	122
• Metodología.	124

CAPÍTULO IV.	129
Desarrollo del sistema tutorial.	
o Aspectos generales.	130
o Planeación del desarrollo del sistema.	130
o Desarrollo de marcos.	131
o Desarrollo de pantallas.	135
o Desarrollo de exámenes y ejemplos.	137
CAPÍTULO V.	138
Manual del usuario.	
CONCLUSIONES.	157
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.	160

Lista de figuras.

Figura	Título	Pág.
Fig. 1.1	Infraestructura de líneas de transporte de hidrocarburos.	5
Fig. 1.2	Transporte de Gas Natural.	6
Fig. 1.3	Líneas de Transporte de Gas L.P.	7
Fig. 1.4	Líneas de Transporte de Petroquímicos.	8
Fig. 1.5	Gráfica para obtener el valor de Z.	14
Fig. 1.6	Proceso de laboratorio para la separación diferencial.	19
Fig. 1.7	Proceso de laboratorio para la separación flash.	19
Fig. 2.1	Diagrama de flujo en conducto aislado.	22
Fig. 2.2	Esquema de rugosidades.	26
Fig. 2.3	Diagrama de Moody.	28
Fig. 2.4	Diagrama simplificado de un sistema de inyección de agua.	35
Fig. 2.5	Determinación gráfica del gasto correspondiente a una Pws dada.	37
Fig. 2.6	Aplicación del análisis nodal a pozos de inyección de agua.	39
Fig. 2.7	Relación entre el gasto de inyección y el diámetro de la línea de descarga.	40
Fig. 2.8	Variación del gasto de inyección al considerar tuberías de producción de diámetros diferentes.	40
Fig. 2.9	Relación entre el gasto de inyección y la presión de bombeo.	41
Fig. 2.10	Nomograma para determinar las caídas de presión en válvulas, codos y conexiones.	42
Fig. 2.11	Esquema de un sistema de transporte en serie.	52
Fig. 2.12	Esquema de un sistema de transporte en paralelo.	54
Fig. 2.13	Presiones consideradas en el flujo a través de estranguladores.	60
Fig. 2.14	Límites de integración y líneas de flujo.	61
Fig. 2.15	Relación de calores específicos en función de la temperatura y densidad relativa.	63
Fig. 2.16	Efecto de Pe sobre el flujo de un estrangulador.	64
Fig. 2.17	Patrones en flujo horizontal, observados por Beggs.	68
Fig. 2.18	Diagrama esquemático de las instalaciones de la Universidad de Tulsa, Oklahoma.	74
Fig. 2.19	Variación de la razón viscosidad de una emulsión / viscosidad del aceite, con el contenido de salmuera en la mezcla.	75
Fig. 2.20	Esquema de los tres problemas en la práctica para flujo en tuberías.	78
Fig. 2.21	Gráfica de q vs. P ₂ .	79
Fig. 2.22	Gráfica de d vs. P ₂ .	79
Fig. 2.23	Circuito de prueba. (Minami y Brill)	82
Fig. 2.24	Mapa de patrones de flujo de Beggs.	85
Fig. 2.25	Factor de fricción para dos fases.	88
Fig. 2.26	Colgamiento en tubería horizontal.	89

Lista de tablas.

Tabla	Título	Pág.
Tabla 1.1	Valores de los coeficientes de la ecuación del factor de compresibilidad.	12
Tabla 1.2	Valores de C_1 , C_2 y C_3 para obtener R_s por Correlación de Vázquez.	16
Tabla 1.3	Valores de C_1 , C_2 y C_3 para obtener B_o por Correlación de Vázquez.	16
Tabla 2.1	Valores de rugosidad de distintos tipos de tuberías.	27
Tabla 2.2	Valores del factor de fricción calculado (f_c).	33
Tabla 2.3	Valores del gasto de inyección.	38
Tabla 2.4	Resultados de los gastos calculado	39
Tabla 2.5	Tabla para determinar el signo del nivel base.	50
Tabla 2.6	Valores más comunes de E para flujo de gas. (según Ikoku)	51
Tabla 2.7	Valores promedio de tensión interfacial.	58
Tabla 2.8	Relación de presión, temperatura y densidad crítica para flujo isoentrópico de un gas ideal.	63
Tabla 2.9	Coefficientes de la ecuación de Mukherjee y Brill, para diferentes patrones de flujo.	69
Tabla 2.10	Clasificación de patrones de flujo.	85
Tabla 2.11	Constantes de los patrones de flujo.	86
Tabla 2.12	Resultados de los pasos 5 a 10 de la Correlación de Beggs y Brill.	88
Tabla 2.13	Resultados de los pasos 5 a 8 de la Correlación de Dukler.	93

Resumen

Desde la creación de las microcomputadoras, gente dedicada a la educación visualizó en esta tecnología una herramienta con un gran potencial y muy propicia para la enseñanza. En la actualidad las computadoras se utilizan no solo para llevar a cabo trabajos con mayor calidad en su presentación o resultados, sino que existen un sin número de aplicaciones (software) relacionadas con muchas áreas del conocimiento.

De esta manera las computadoras han iniciado su participación en forma activa dentro de la enseñanza, trayendo como consecuencia el desarrollo de software con fines educativos.

Esta fue la razón para llevar a cabo este trabajo, con la finalidad de incluir la tecnología de cómputo al sistema tradicional de enseñanza-aprendizaje; basada en la necesidad de transmitir conocimientos de una manera sencilla, eficiente, actualizada y entendible, en donde el trasmisor es el programa de cómputo, el receptor es el alumno y el ambiente de enseñanza es la computadora, que con la ayuda del diseño y desarrollo de herramientas gráficas y analíticas muestran de una manera amigable temas de estudio enfocado al transporte de hidrocarburos por ductos; y esto en su conjunto es conocido como Sistema Tutorial.

Dicho Tutorial lo llamamos **POWER FLOW** y está conformado por 5 capítulos que contienen Diseño de imágenes, Síntesis de temas, Audio y Video, Sección de Ejemplos y una Evaluación de la información proporcionada en cada capítulo. Su contenido se muestra a continuación:

Capítulo 1-. **Propiedades de los fluidos.**

Capítulo 2-. **Fundamentos de flujo a través de tubería.**

Capítulo 3-. **Flujo de líquidos por tuberías.**

Capítulo 4-. **Flujo de gas a través de tubería y estranguladores.**

Capítulo 5-. **Conceptos básicos de flujo multifásico.**

Lo que respecta al trabajo escrito en el Capítulo I se hace mención de la historia e importancia que tiene el transporte de hidrocarburos dentro del proceso de producción del petróleo, y anexamos propiedades y correlaciones importantes de dichos hidrocarburos.

En el CAPÍTULO II se trataron conceptos teóricos de flujo de fluidos a través de tubería, mencionando la ecuación general de energía, así como, el cálculo de pérdidas de presión por fricción, rugosidad y ejemplos de aplicación. Se analizó también el flujo de líquidos por tubería conociendo el número de Reynolds y la eficiencia de flujo, el flujo de gas por tubería y estranguladores y el flujo multifásico en tubería horizontal.

En el CAPÍTULO III se analizan las técnicas para el diseño de un sistema tutorial, mostrando sus características principales y analizando las siguientes interrogantes: ¿Qué transmitir? y ¿Cómo transmitirlo?, esto nos dio la pauta en el diseño y estructura del programa, seleccionando el lenguaje de programación a utilizar, el estilo y objetivo principal sin olvidar las limitantes como: tiempo, recursos y metodología.

Una vez definida la estructura y metodología a emplear, en el CAPÍTULO IV se desarrolla el sistema, es decir, se hace la planeación y creación de videos, gráficos, información técnica que se va a presentar, se define la secuencia de la información y la profundidad de su contenido.

Por último en el CAPÍTULO V se desarrolla y presenta un Manual del usuario, que permite una correcta y eficiente utilización del programa realizado, dando instrucciones necesarias para un buen aprovechamiento, con el fin de minimizar las dudas en su aplicación.



Introducción

Introducción

A través de la historia, las sociedades han tenido un interés especial por la formación de su gente, a la par con este interés surge la necesidad en la continua trasmisión del conocimiento, pensando en el incremento y la eficiencia del mismo; recientemente se ha enfatizado, sobre todo, en la eficiencia del aprendizaje de ese conocimiento^(1 - 4).

La educación convencional se basa en cuatro factores primordiales: un transmisor (profesor), un receptor (alumno), un ambiente (sesión de clase) y el contenido. La necesidad de mejorar el proceso educativo de una manera sencilla, eficiente, actualizada y entendible, ha llevado a la búsqueda de mejores métodos de enseñanza - aprendizaje.

Hoy en día estudios han detectado que si se emplean más sentidos (vista, tacto, oído, gusto y olfato) para este fin, el resultado se vera incrementado.

En la actualidad, las computadoras se utilizan no sólo para llevar a cabo trabajos con mayor calidad en su presentación o resultados, sino que en estos tiempos tenemos a nuestro alcance aplicaciones de la misma para el estudio de diversas disciplinas (Software).

Desde la creación de las microcomputadoras (1977), gente dedicada a la educación visualizó en esta tecnología una herramienta con un gran potencial y muy propicia para el proceso enseñanza - aprendizaje, prueba de ello está que hoy en día en la mayoría de los países cuentan ya en sus escuelas con computadoras y junto con éstas, también imparten a la informática como asignatura.

Esto da pauta para que la Computación sea una nueva alternativa de comunicación, hombre - maquina, ya que con los avances que se han tenido con las interfaces gráficas, se han creado herramientas que facilitan el diseño de programas, como son los lenguajes de alto nivel

^(1 - 4) Referencias al final.

(Visual Basic, Visual C, etc.), con los que se pretende presentar información de alto contenido académico, y de esta manera generar un nuevo estilo de educación, en donde el trasmisor es el programa de computo, el receptor es el alumno y el ambiente de enseñanza - aprendizaje es la computadora. A este tipo de desarrollo de Software se le conoce como Sistema Tutorial.

Los sistemas tutoriales tienen como objetivo mostrarle al receptor (alumno) la información, enseñar conceptos, principios, etc., así como proporcionar ejemplos de los temas; todo esto de una manera fácil y sencilla de entender para el alumno, por lo cual el aprendizaje será mas eficiente. El uso de un tutorial por computadora nos presenta algunas ventajas como las siguientes:

- Los sistemas tutoriales pueden enriquecer el acervo cultural del alumno.
- No les afecta el estado de ánimo del receptor.
- Son imparciales (no existe la preferencia).
- No se desesperan.

También existen desventajas como son:

- Normalmente no se pueden explicar conceptos de diferentes maneras.
- No se llevan a cabo analogías.
- El factor humano efectivo se pierde.

De esta manera las computadoras han empezado a participar en forma activa dentro del proceso enseñanza - aprendizaje, trayendo como consecuencia el desarrollo de software con fines educativos.

Estos fueron los motivos para el desarrollo de este trabajo de tesis, ya que el objetivo de es el de desarrollar un sistema tutorial, lo cual implica también el diseño y desarrollo de herramientas gráficas y analíticas que muestren, de una manera amigable, temas de estudio enfocado al transporte de hidrocarburos por ductos.



Capítulo I

Conceptos generales.

Conceptos generales.

Transporte de hidrocarburos.

Normalmente los campos petrolíferos se encuentran en zonas muy alejadas de los lugares o centros de proceso y consumo, de modo que la conducción del petróleo hasta las refinerías exige inversiones considerables en oleoductos, que van del pozo al puerto o al lugar de almacenamiento más próximo.

Por esto surge la necesidad del estudio y análisis del comportamiento de los fluidos a través de ductos, su diseño y optimización de las instalaciones que se requieran para el manejo de los hidrocarburos que se necesiten transportar.

Los inicios del transporte de hidrocarburos de México.

El transporte y distribución de gas natural se inició en México en 1930, con la operación de los gasoductos de 155 kilómetros entre Ciudad Alemán y Monterrey y 62 kilómetros entre las poblaciones de Naco y Cananea, a la compañía minera de Cananea en Sonora. Ambos gasoductos se proveían de gas natural de importación. Veinte años más tarde, en 1950, entró en operación el primer gasoducto propiedad de PEMEX, construido con tubería de 20 pulgadas y con longitud de 250 Km, para el transporte del gas natural, producido en los campos de Poza Rica, Veracruz, hacia el Valle de México, para un consumo de 130 millones de pies cúbicos diarios.

Con el propósito de evitar la escasez y la falta de abastecimiento oportuno, no solo se aumentó la capacidad de refinación, sino que también se le dió especial atención a los sistemas de transporte y a la construcción de nuevas plantas de almacenamiento. Las necesidades de transporte más urgente se resolvieron complementando el sistema de tuberías para la conducción de petróleo crudo, gas natural y productos refinados.

La longitud de los ductos se aumentó de 7,301 kilómetros en diciembre de 1958, a 11,549 en marzo de 1964, es decir, en un 58 por ciento, y en más de un 75 por ciento de capacidad. Los medios de transporte y distribución terrestre, fundamentalmente los auto - tanques, fueron sujetos a un programa de reposición, en vista de que algunas unidades

contaban ya con quince o más años de servicio. Debido al bajo costo del transporte por tuberías, y dentro de la política de conservación de recursos realizadas por PEMEX, durante el gobierno de López Mateos se siguió la consigna de cambiar el sistema de transporte por el de tuberías.

Como resultado de esta política, en 1958 se puso en servicio el segundo gasoducto para conducir el gas producido en los yacimientos del norte, cerca de Reynosa, hasta Monterrey, Saltillo y Torreón. Constaba de dos tramos de tubería uno de 22 pulgadas con 225 Km de extensión, entre Reynosa y Monterrey, y otro de 16 pulgadas con 310 Km de extensión, de Monterrey a Torreón, con un ramal de 30 Km a Saltillo.

El surgimiento de Ciudad PEMEX, en Tabasco, quedó reservada para el último año de gobierno de don Adolfo Ruíz Cortínez, ésta fue la inauguración de una de las más ambiciosas obras que haya realizado la industria petrolera mexicana. A lo largo de 1956 y durante todo el año de 1957, se construyó febrilmente, trabajando en turnos continuos, incluso los domingos y los días festivos, un conjunto de instalaciones que, bajo el nombre de Ciudad PEMEX, comenzaron a funcionar el 3 de marzo de 1958 y permitieron aprovechar los grandes recursos de gas existentes en el estado de Tabasco. Esta realización fue considerada apenas como el paso previo para el tendido de un amplio gasoducto que abastecería a los centros industriales de Veracruz, Puebla y la Ciudad de México, posteriormente a la Ciudad de Salamanca.

El tramo Ciudad PEMEX - México, entró en operación el 12 de enero de 1961, y el segundo el 15 de mayo el mismo año. Adicionalmente se construyó el poli - ducto Minatitlán - México. Estas obras contribuyeron a elevar el consumo de gas en la Ciudad de México de 800 mil metros cúbicos en 1958, a más de 8 millones en 1963 y, por otro lado, la refinería de Minatitlán pudo trabajar en apoyo a la de Azcapotzalco, que ya no podía ampliarse.

Como medidas adicionales en el norte del país se terminaron las tuberías paralelas para conducir gas natural y refinados a Salamanca, Monclova, Gómez Palacio, Camargo, Chihuahua, Guadalajara y San Luis Potosí. Estos son los inicios de una red de tuberías que aseguran el transporte de los productos petrolíferos entre los campos de producción, las plantas de

procesamiento y los centros de distribución para el consumo interno del país. Los ductos, son piezas vitales y día a día cobran una mayor importancia.

La intensa actividad petrolera desarrollada en el país a partir de los años 60's, abrió nuevos campos petroleros y en 1972 se dio a conocer públicamente el descubrimiento de la nueva provincia productora de hidrocarburos, al terminar la perforación de los primeros pozos productores, Cactus 1 y Sitio Grande 1. En 1976 nuevamente se dió a conocer el descubrimiento de los campos de la Sonda de Campeche, siendo hasta la fecha la provincia petrolera más importante del país.

El incremento en la producción de hidrocarburos requirió la construcción de nuevos ductos. Actualmente el sistema nacional de Ductos, tiene una longitud de mas de 60 mil kilómetros.

Importancia del transporte de hidrocarburos por ductos.

En el mundo del petróleo los oleoductos y los buques tanques son los medios por excelencia para el transporte del crudo. El paso inmediato al descubrimiento y explotación de un yacimiento es su traslado hacia los centros de refinación o a los puertos de embarque con destino a la exportación. Para ello se construye un oleoducto, trabajo que consiste en unir tubos de acero a lo largo de un trayecto determinado, desde el campo productor hasta el punto de refinación y/o de embarque. La capacidad de transporte de los oleoductos varía y depende del tamaño de la tubería, es decir, entre más grande sea el diámetro, mayor la capacidad.

Estas líneas de acero pueden ir sobre la superficie o bajo tierra y atraviesan la más variada topografía. En la parte inicial del oleoducto se encuentra una estación de bombeo que impulsa el petróleo y, dependiendo de la topografía por donde éste pase, se colocan estratégicamente otras estaciones para que le permitan superar sitios de gran altura.

Los oleoductos disponen también de válvulas que permiten controlar el paso del petróleo y atender oportunamente situaciones de emergencia. El gas natural se transporta en idénticas circunstancias, pero en este caso la tubería se

denomina gasoducto. Hay ductos similares que cumplen funciones específicas: poli-ductos para gasolinas y otros derivados; propano - ductos para gas propano, combustóleo - ductos para combustóleo, etc.

El Sistema de Información Geográfica de Derechos de Vía e Instalaciones (Sigedi)

Trabajar en la región sur en áreas abiertas, en los derechos de vía, en la localización de los caminos y la interrelación con múltiples comunidades de una densidad de población muy importante, exige contar con información precisa y confiable, para poder trabajar con seguridad y darle a la población respuestas oportunas y seguras en todo momento, pero sobre todo garantizar el mantenimiento de los ductos para que operen en óptimas condiciones y le den tranquilidad a la población. El control de la información geográfica de los predios por donde atraviesan los derechos de vía de los ductos es fundamental para llevar a cabo una planeación efectiva de las obras y de los trabajos de mantenimiento.

PEMEX Gas y petroquímica básica cuenta con 8 complejos procesadores de gas natural con las siguientes capacidades: endulzamiento de gas: 3,753 mmpcd; recuperación de líquidos: 5,309 mmpcd; fraccionamiento de líquidos: 554 mbd. Para el transporte de gas natural, opera 9,031 km de ductos.

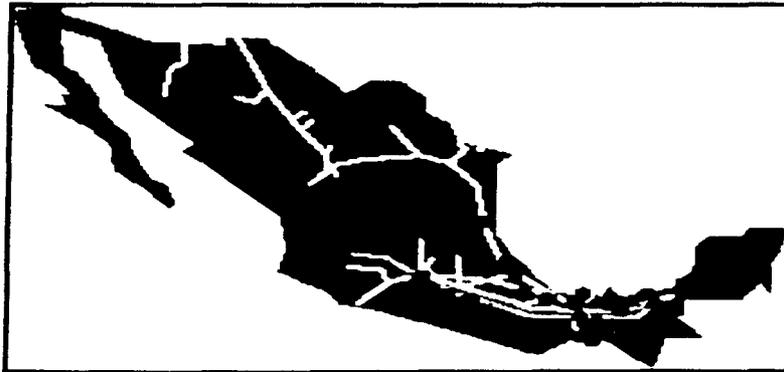


Fig. 1.1-. Infraestructura de líneas de transporte de hidrocarburos.

283,000 BHP de compresión y 620 estaciones de medición en puntos de entrega, además de 6 interconexiones con sistemas de gasoductos norteamericanos. La logística del gas licuado se apoya en 16 terminales de distribución y 1,822 km de ductos con una capacidad de bombeo de 220 mbd. Para el manejo de petroquímicos básicos, se cuenta con 1,023 km de ductos.

El Sistema Nacional de Gasoductos (SNG) pasa por 18 estados de la República. Inicia en Chiapas y pasa por Veracruz y Tabasco hasta Tamaulipas con líneas de 24, 36 y 48 pulgadas de diámetro; posteriormente se prolonga por los estados de Nuevo León, Coahuila, Durango y Chihuahua, con líneas de 24 y 36 pulgadas de diámetro.

Existen tres líneas importantes de 18, 24 y 36 pulgadas que recorren el centro del país pasando por los estados de Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, México, Querétaro, Guanajuato, San Luis Potosí, Michoacán y Jalisco. En Naco, Sonora, inicia un ducto de 327 kilómetros de longitud para la importación de gas natural, de los Estados Unidos de América a Hermosillo.

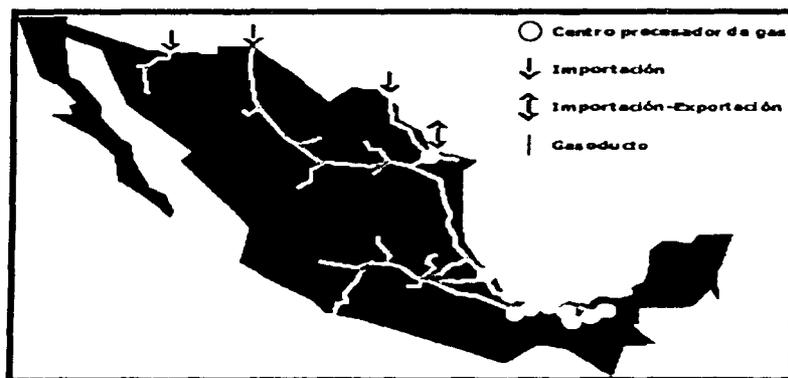


Fig. 1.2-. Transporte de Gas Natural.

La extensión total del SNG es de 9,031 km. y cuenta con 8 estaciones de compresión; 3 en el sur del sistema en el área de Cárdenas y Minatitlán, una en Valtierrilla, Guanajuato, y 4 en la parte norte en los estados de Tamaulipas y Nuevo León.

El SNG cuenta con puntos de inyección de gas natural de origen nacional y puntos de conexión internacional. A través de estos últimos se pueden realizar operaciones de importación o exportación con los Estados Unidos.

El Sistema Nacional de Gas Licuado del Petróleo, con una extensión total de 1,822 kms y 5 estaciones de bombeo, extiende a lo largo de 11 estados de la República, iniciando en Cactus, Chiapas, hasta Guadalajara, Jalisco, pasando por Tabasco, Veracruz, Puebla, Edo. de México, Hidalgo, Querétaro, Guanajuato y Jalisco, con líneas de 20, 22 y 14 pulgadas de diámetro.

De Minatitlán parte un ducto de 14 pulgadas al puerto de Salina Cruz, Oaxaca.

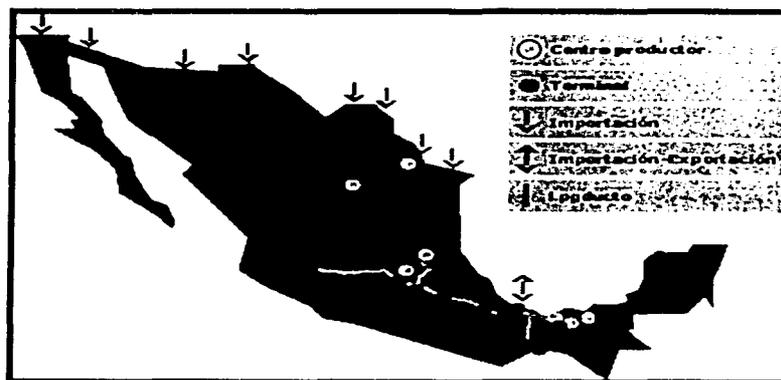


Fig. 1.3-. Líneas de Transporte de Gas L.P.

A través de un ducto de 14 pulgadas, llega a la Ciudad de México la quinta parte de su consumo. El resto por vía terrestre desde puntos cercanos como son Puebla y Tepeji de Río. Este sistema, con 1023 kilómetros de ductos, tiene como propósito llevar petroquímicos básicos de los centros de producción a los puntos de consumo propiedad de Petróleos Mexicanos, en donde son procesados o reprocesados. Por este sistema se transportan productos tales como gasolinas amargas, gas seco y gas húmedo, entre otros.

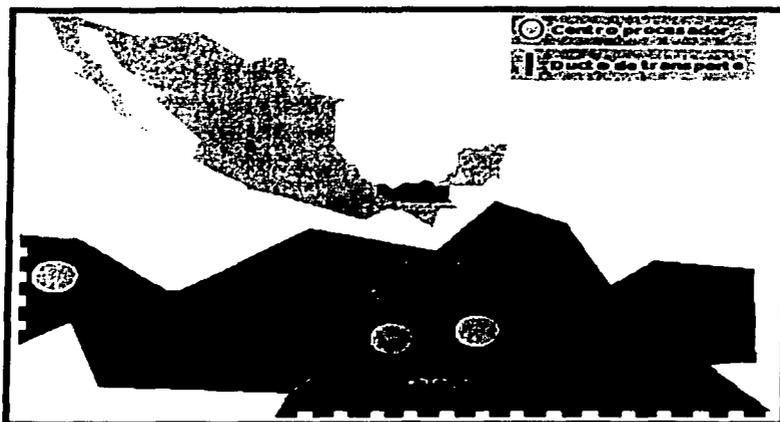


Fig. 1.4-. Líneas de Transporte de Petroquímicos.

Lo anterior es una breve reseña histórica de la industria de la explotación de los hidrocarburos en México, la cual ha tenido que renovarse día a día por la gran necesidad del empleo de éstos, tanto en la generación de energía como en el desarrollo de nuestras vidas cotidianas.

Esta es la razón por la cual vimos la necesidad de llevar a cabo una alternativa mas, la cual se empleé y ayude en la formación de futuros ingenieros petroleros; ya que tendremos en nuestras manos el seguimiento en la evolución y modernización de esta industria en nuestro país.

Propiedades PVT.

La importancia del estudio de las propiedades PVT surge de la necesidad de saber y conocer las características de los productos que se manejarán; algunas de estas propiedades son:

- *Densidad relativa del gas (γ_g):* Es el peso molecular de un gas entre el peso molecular del aire.
- *Factor de compresibilidad (Z):* A este también se le denomina factor de desviación o factor de súper compresibilidad, este es un factor que se incluye en la ley de los gases ideales para tomar en cuenta la desviación que experimenta un gas real con respecto a un gas ideal.
- *Factor de volumen del aceite (B_o):* Es la relación del volumen de un líquido, medido a condiciones de yacimiento con el volumen de este líquido medido a condiciones estándar, después de que sale de los separadores.
- *Factor de volumen del gas (B_g):* Este se define como el volumen de una masa de gas medido a condiciones de yacimiento, dividido entre la misma masa de gas pero a condiciones estándar.
- *Presión de vapor:* Es la presión que ejerce el vapor de una sustancia cuando ésta y el vapor están en equilibrio, el equilibrio se establece cuando el ritmo de evaporación de una sustancia es igual al ritmo de condensación de su vapor. Dentro de esta definición es importante hablar de la *Presión de vapor Reid* ya que éste es un parámetro para la transportación de los hidrocarburos, esta presión se define como la presión que ejerce el vapor en una celda especial, a cien grados Fahrenheit, siguiendo con las normas de evaluación ya estipuladas.
- *Presión de Saturación (P_{sat}):* Esta propiedad es también llamada punto de burbujeo. El valor de la propiedad se obtiene al llevarse a cabo pruebas PVT en los fluidos, dicho valor se toma cuando aparece la primer burbuja de gas.

En el proceso de obtención se somete el fluido a ciertas condiciones de presión y temperatura, al mismo tiempo el fluido es mantenido en movimiento constante hasta lograr una estabilidad del mismo. Lo anterior se debe a que puede aparecer la primer burbuja de gas y con el movimiento de la celda la burbuja llega a desaparecer disolviéndose en el líquido; esta es la razón por la cual en cuanto se estabiliza el fluido se toma la lectura de la presión de saturación a la temperatura base.

- *Presión en de Rocío (P_r):* El proceso de obtención de este valor de presión es similar al de obtención de la P_{sat} , la diferencia radica en que el valor es tomado en cuanto aparece la primer gota de líquido en una muestra de gas.
- *Relación Gas Aceite (RGA):* Son los pies cúbicos de gas producidos por cada barril de aceite que se extrae, ambos medidos a condiciones estándar.
- *Relación de solubilidad (R_s):* Son los pies cúbicos de gas disuelto en el aceite a ciertas condiciones de presión y temperatura por cada barril de aceite producido y ambos volúmenes medidos a condiciones estándar.

El primer problema que surge en relación con la determinación de las propiedades de los fluidos, es la carencia de análisis PVT apropiados de laboratorio. El análisis con que se cuenta generalmente es una separación diferencial, realizada a temperatura del yacimiento, bajo condiciones de equilibrio; sin embargo, al pasar los fluidos a través de la tubería de producción y escurrir por la línea de descarga, su temperatura disminuye y el gas librado no es el que correspondería a condiciones de equilibrio, lo que acarrea un margen de error. Para conocer las diferentes presiones y temperaturas las propiedades de los fluidos, se utilizan generalmente correlaciones cuando se trata de aceites negros, o bien, análisis composicionales cuando se trata de aceites volátiles y condensados.

Siguiendo con el análisis de las propiedades de los fluidos, surge también la necesidad de conocer otros métodos de obtención de dichas propiedades, estos métodos son el empleo de las correlaciones PVT, las cuales se utilizan cuando

no se tienen muestras representativas del laboratorio, sin dejar de lado los análisis PVT que es la manera correcta de obtener dichas propiedades.

Correlaciones PVT.

Una correlación es aquella que se emplea cuando no hay una ley general que resuelva el problema y se obtiene de ajustar una serie de ecuaciones, graficas o de información obtenida de gráficas experimentales.

Para el empleo de correlaciones se recomienda tener datos medidos, ya que se intenta trabajar a ciertas condiciones; con las correlaciones se intenta simular el comportamiento de los fluidos y estos resultados se comparan con los datos obtenidos. Existe un gran número de correlaciones que se pueden emplear en la obtención de las propiedades PVT, a continuación se enlistan algunas de estas correlaciones.

- *Factor de compresibilidad del gas (Z):* Las curvas correspondientes a los gases han sido establecidas utilizando gases de los separadores y vapores obtenidos en los tanques. Éstos tienen altas proporciones de metano y etano. Las curvas correspondientes a los condensados pertenecen a gases que contienen cantidades relativamente grandes de los componentes intermedios (C_2 a C_6), Standing, sugiere el uso de las curvas de condensados en los cálculos que involucran gases en equilibrio con el aceite, y el uso de las curvas correspondientes al gas para gases superficiales.

Las ecuaciones para gases superficiales son:

$$T_{rc} = 167 + 316.67\gamma_{ef} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

$$P_{rc} = 702.5 - 50\gamma_{ef} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

y las ecuaciones para gases húmedos son:

$$T_{rc} = 238 + 210\gamma_{ef} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

$$P_{rc} = 740 - 100\gamma_{ef} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Las siguientes ecuaciones permiten calcular, por modo iterativo el valor de Z.

$$T_{pr} = \frac{T + 460}{T_{pc}} \quad (\text{Ec. 1.5})$$

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

$$\rho_r = \frac{0.27 P_{pr}}{Z T_{pr}} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

$$Z = 1 + \left(\frac{A_1 + A_2}{T_{pr}} + \frac{A_3}{T_{pr}^2} \right) \rho_r + \left(\frac{A_4 + A_5}{T_{pr}} \right) \rho_r^2 + \left(\frac{A_6 A_8 \rho_r^3}{T_{pr}} \right) + \left(\frac{A_7 \rho_r^2}{T_{pr}^2} \right) (1 + A_1 \rho_r^2) \exp(-A_1 \rho_r^2) \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Donde los valores de los coeficientes son:

$A_1 = 0.31506$	$A_5 = -0.6123$
$A_2 = -1.0467$	$A_6 = -0.10489$
$A_3 = -0.5783$	$A_7 = 0.68157$
$A_4 = 0.53530$	$A_8 = 0.68446$

Tabla 1.1-. Valores de los coeficientes de la ecuación del factor de compresibilidad.

- *Corrección para el factor Z del gas por presencia de otros gases:* Las propiedades pseudo-críticas de gases que contiene cantidades apreciables de CO₂ y H₂S, pueden calcularse por el método de Standing y Katz, modificado por Wichert y Aziz.

La modificación de este método consiste en emplear un factor de ajuste (ϵ_3) para calcular la presión y temperaturas pseudo-críticas:

$$T'_{pc} = T_{pc} - \epsilon_3 \quad (\text{Ec. 1.9})$$

$$P'_{pc} = \frac{P_{pc} T'_{pc}}{(T_{pc} + Y_{H_2S} (1 - Y_{H_2S}) \epsilon_3)} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

$$\epsilon_3 (^{\circ}R) = 120 \left(Y_{\frac{CO_2}{H_2S}}^{0.9} - Y_{\frac{CO_2}{H_2S}}^{1.6} \right) + 15 \left(Y_{H_2S}^{0.5} - Y_{H_2S}^4 \right) \quad (\text{Ec. 1.11})$$

donde:

$Y_{\frac{CO_2}{H_2S}}$ » Es la suma de las fracciones molares del CO_2 y del H_2S .

Y_{H_2S} » Es la fracción molar del H_2S .

Los valores de T'_{pc} y P'_{pc} los cuales son obtenidos con las ecuaciones antes mencionadas, se sustituyen en vez de T_{pc} y P_{pc} , empleadas en la expresión para el cálculo del factor de compresibilidad Z .

La figura que aparece a continuación se emplea para la obtención del factor de compresibilidad (Z) de modo gráfico.

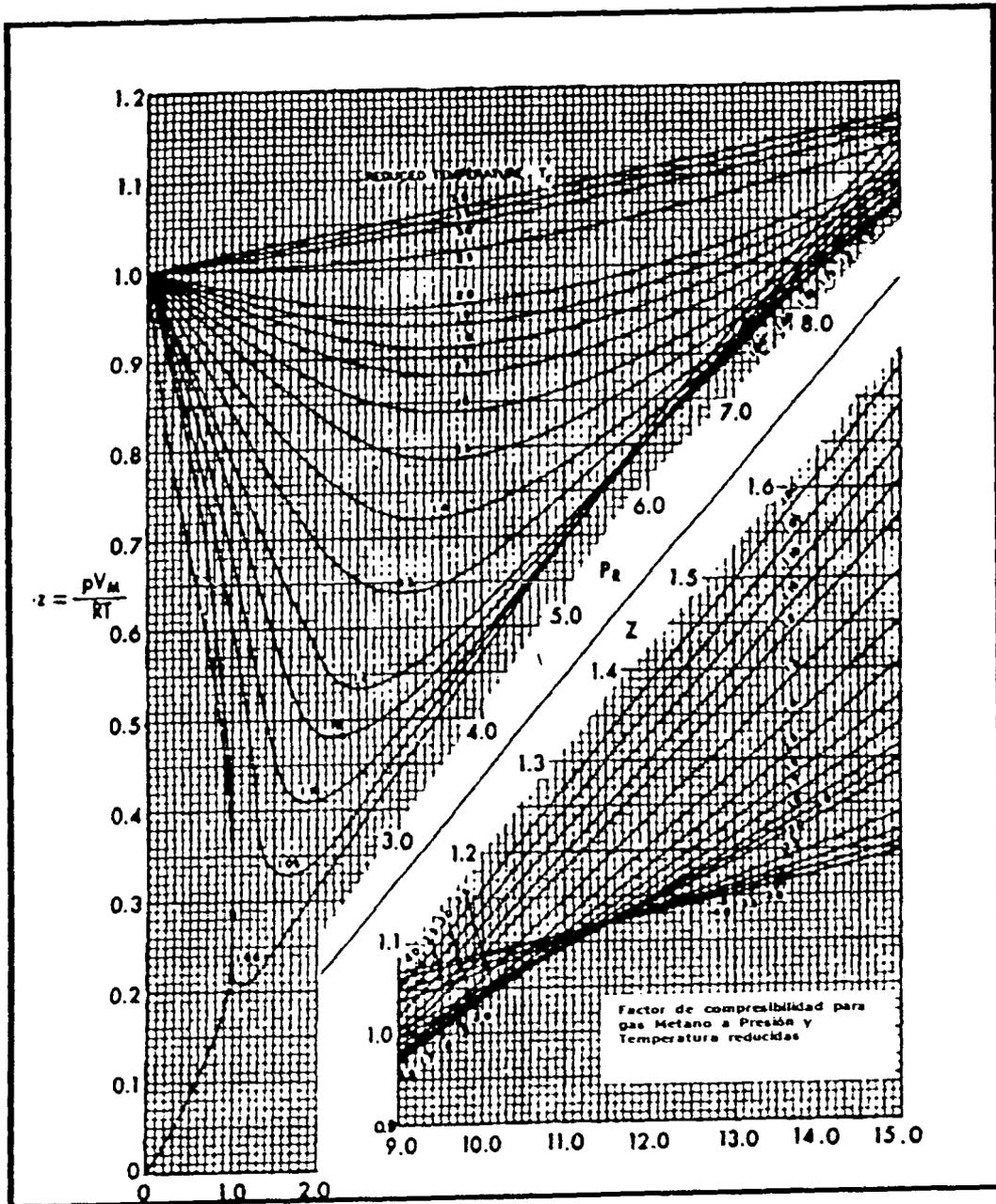


Fig. 1.5-. Gráfica para obtener el valor de Z.

- **Correlación de Standing:** Esta correlación establece las relaciones empíricas observadas entre la presión de saturación y el factor de volumen del aceite (B_o), las densidades del gas, del aceite producido, la presión y la temperatura.

La correlación se estableció para aceites y gases producidos en California y para otros sistemas de crudo de bajo encogimiento, simulando una separación instantánea en dos etapas a 100 °F. La primera etapa se realizó a una presión de 250 a 450 (lb/pg²) y la segunda etapa a la presión atmosférica.

$$P_{sat} = 18 \left[\left(\frac{R_s}{\gamma_{gd}} \right)^{0.83} 10^{(0.00091T - 0.0125 \cdot API)} \right] \quad (\text{Ec. 1.12})$$

$$R_s = \gamma_{gd} \left[\left(\frac{P}{18} \right) 10^{(0.0125 \cdot API - 0.00091T)} \right]^{\frac{1}{0.83}} \quad (\text{Ec. 1.13})$$

$$B_o = 0.972 + 0.000147 (F)^{1.175} \quad (\text{Ec. 1.14})$$

$$F = R_s \left(\frac{\gamma_{gd}}{\gamma_o} \right)^{0.5} + 1.25 T \quad (\text{Ec. 1.15})$$

- **Correlación de Vázquez:** Como el valor de la densidad relativa es un parámetro de correlación importante, se decidió usar un valor de dicha densidad relativa normalizando a una presión de separación de 100 (lb/pg²), por lo tanto, el primer paso para usar estas correlaciones consiste en obtener el valor de la densidad relativa del gas a dicha presión.

$$\gamma_{gs} = \gamma_{gp} \left(1 + 5.912 \cdot 10^{-5} \cdot API T, \log \left(\frac{P_s}{114.7} \right) \right) \quad (\text{Ec. 1.16})$$

$$P_{sw} = \left(\frac{\text{Re}xp \left(\frac{-C_3 \cdot API}{(T + 460)} \right)}{C_1 \gamma_{gs}} \right)^{\frac{1}{C_2}} \quad (\text{Ec. 1.17})$$

La correlación para determinar R_s se afino dividiendo los datos en dos grupos, de acuerdo con la densidad del aceite. Se obtuvo la siguiente ecuación:

$$R_s = C_1 \gamma_{st} P^C \exp \left(\frac{C_3 \text{ } ^\circ \text{API}}{(T + 460)} \right) \quad (\text{Ec. 1.18})$$

Los valores de C_1 , C_2 y C_3 son para:

Coeficiente	$^\circ \text{API} \leq 30^\circ$	$^\circ \text{API} > 30^\circ$
C_1	0.0362	0.0178
C_2	1.0937	1.1870
C_3	25.724	23.931

Tabla 1.2-. Valores de C_1 , C_2 y C_3 para obtener R_s por Correlación de Vázquez.

La expresión para determinar el factor de volumen (B_o)

$$B_o = 1 + C_1 R_s + (T - 60) \left(\frac{^\circ \text{API}}{\gamma_{st}} \right) (C_2 + C_3 R_s) \quad (\text{Ec. 1.19})$$

Los valores de C_1 , C_2 y C_3 son para:

Coeficiente	$^\circ \text{API} \leq 30^\circ$	$^\circ \text{API} > 30^\circ$
C_1	$4.677 \cdot 10^{-4}$	$4.670 \cdot 10^{-4}$
C_2	$1.751 \cdot 10^{-5}$	$1.100 \cdot 10^{-5}$
C_3	$-1.811 \cdot 10^{-8}$	$1.337 \cdot 10^{-9}$

Tabla 1.3-. Valores de C_1 , C_2 y C_3 para obtener B_o por Correlación de Vázquez.

- **Correlación de Oistein:** Esta correlación fue establecida utilizando muestras de aceite producido en el Mar del Norte, donde predominan los aceites de tipo volátil. Los valores de R_s y B_o se obtienen de la forma siguiente:

$$\log P^* = -2.57364 + 2.35772 \log P - 0.703988 \log^2 P + 0.098479 \log^3 P \quad (\text{Ec. 1.20})$$

$$P_{sat} = 10 \left(1.7669 + 1.7447 \log P_{sw}^* - 0.30218 \log^2 P_{sw}^* \right) \quad (\text{Ec. 1.21})$$

$$P_{sat}^* = \left(\frac{R}{\gamma_{gd}} \right)^{0.816} \left(\frac{T^{0.130}}{API^{0.989}} \right) \quad (\text{Ec. 1.22})$$

$$R_s = \gamma_{gd} \left(\frac{P^* \circ API^{(0.989)}}{T^a} \right)^{\frac{1}{0.816}} \quad (\text{Ec. 1.23})$$

$a = 0.130$ para aceites volátiles y 0.172 para aceites negros

$$B_o^* = R_s \left(\frac{\gamma_{gd}}{\gamma_o} \right)^{0.526} + 0.968 T \quad (\text{Ec. 1.24})$$

$$a = -6.5811 + 2.1329 \log B_o^* - 0.27683 \log^2 B_o^* \quad (\text{Ec. 1.25})$$

$$B_o = 1 + 10^a \quad (\text{Ec. 1.26})$$

- **Correlación de Lasater:** La correlación de Lasater se basa en 158 mediciones experimentales de la presión en el punto de saturación de 137 sistemas independientes, producidos en Canadá, en el centro y oeste de E.E.U.U. y América del Sur. El error promedio en la representación algebraica es del 3.8 % y el máximo error encontrado es del 14.7 %. Correlación de Lasater para un aceite saturado.

$$P_{sat} = \frac{P_f (T + 460)}{\gamma_{gd}} \quad (\text{Ec. 1.27})$$

donde P_f es el factor de presión en el punto de saturación

$$P_f = 504.3 \cdot 10^{-2} \gamma_o^3 + 310.526 \cdot 10^{-2} \gamma_o^2 + 136.266 \cdot 10^{-2} \gamma_o + 119.118 \cdot 10^{-3} \quad (\text{Ec. 1.28})$$

La fracción molar del gas se calcula con la siguiente expresión:

$$\gamma_g = \frac{\frac{R_s}{379.3}}{\frac{R_s}{379.3} + \frac{350 \gamma_o}{M_o}} \quad (\text{Ec. 1.29})$$

La masa del aceite (M_o) se correlacionó con los ($^{\circ}\text{API}$) del aceite del tanque de almacenamiento a cuyas curvas se le ajustaron las siguientes expresiones:

$$\text{Si } 15 \leq ^{\circ}\text{API} < 40 \quad M_o = \frac{(63.506 - ^{\circ}\text{API})}{0.0996} \quad (\text{Ec. 1.30})$$

$$\text{Si } 40 \leq ^{\circ}\text{API} < 55 \quad M_o = \left(\frac{1048.33}{^{\circ}\text{API}} \right)^{1.6736} \quad (\text{Ec. 1.31})$$

La expresión para calcular R_s se obtuvo de la ecuación para la fracción molar:

$$R_s = 132755 \frac{Y_g \gamma_o}{(1 - Y_g) M_o} \quad (\text{Ec. 1.32})$$

A la fracción molar en función de la P_{sat} se le ajustó la siguiente ecuación:

$$Y_o = 419.545 \cdot 10^{-5} (P_r)^3 + 591.428 \cdot 10^{-4} (P_r)^2 + 334.519 \cdot 10^{-3} (P_r) + 169.8799 \cdot 10^{-4} \quad (\text{Ec. 1.33})$$

- **Ajustes PVT:** Durante la producción de un yacimiento se presentan dos procesos de separación: diferencial e instantánea. La liberación diferencial está definida como un proceso en el que a cada nivel de presión se le extrae el gas liberado. En contraste la liberación instantánea, se conserva todo el gas liberado a cada nivel de presión. Cuando la saturación del gas en el yacimiento alcanza la saturación crítica, el gas comienza a fluir y es removido del yacimiento, presentándose una separación diferencial.

Sin embargo gran parte del gas permanece en el yacimiento cuando la presión baja, lo que corresponde a una liberación instantánea. Entonces se puede observar que en el yacimiento el proceso comienza con una liberación instantánea, llegando a ser una combinación de liberaciones instantánea y diferencial. Cuando el gas del aceite entra a la tubería, fluyen juntos hasta el separador. Ahí el gas disuelto se separa del aceite, donde se considera que se tienen condiciones de equilibrio.

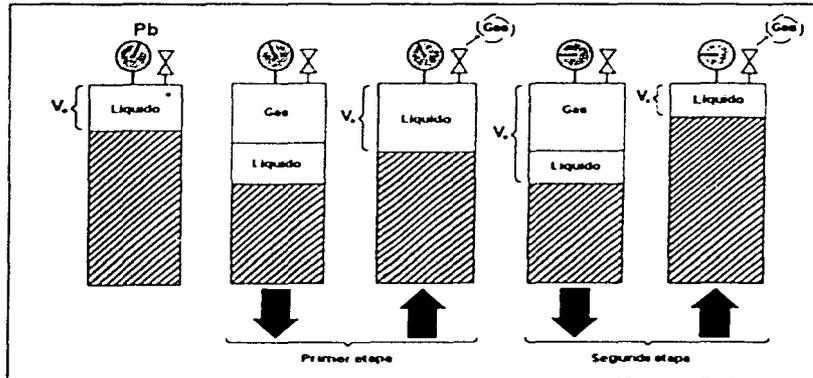


Fig. 1.6-. PROCESO DE LABORATORIO PARA LA SEPARACION DIFERENCIAL

Esta es una separación instantánea. El proceso de liberación en el yacimiento se simula en el laboratorio con una liberación diferencial. La liberación instantánea se simula en el laboratorio con prueba de separadores. En el laboratorio, la liberación diferencial consiste en una serie de 10 a 15 liberaciones instantáneas.

A cada nivel de presión el gas se libera y se mide al igual que el volumen de aceite remanente. Este proceso continúa hasta la presión atmosférica, se mide el aceite residual y se calcula su volumen a 60°F o 16°C.

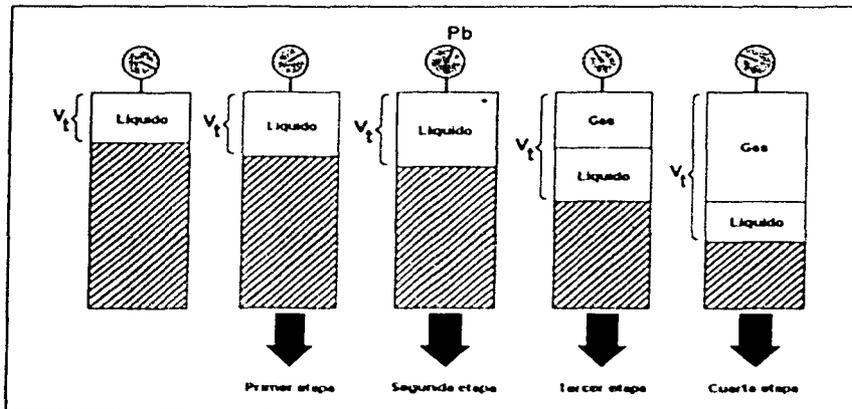


Fig. 1.7-. PROCESO DE LABORATORIO PARA LA SEPARACION FLASH

La razón por la cual se hizo mención y análisis de las correlaciones anteriores, es por que son las que más se asemejan al comportamiento de los fluidos de los campos en México, esto se determina después de probar con un gran número de expresiones y compararlas posteriormente con los resultados de pruebas llevadas a cabo en laboratorio.

Como se dijo anteriormente, lo ideal seria la elaboración de análisis de laboratorio de cada una de las muestras de los campos, pero los costos se elevarían de una manera considerable.



Capítulo II

**Conceptos teóricos de flujo
de fluidos a través de tubería.**

Fundamento de flujo a través de tubería.

Ecuación general de energía.

La ecuación general que gobierna el flujo de fluidos a través de una tubería, se obtiene a partir de un balance macroscópico de la energía asociada a la unidad de masa de un fluido, que pasa a través de un elemento aislado del sistema.

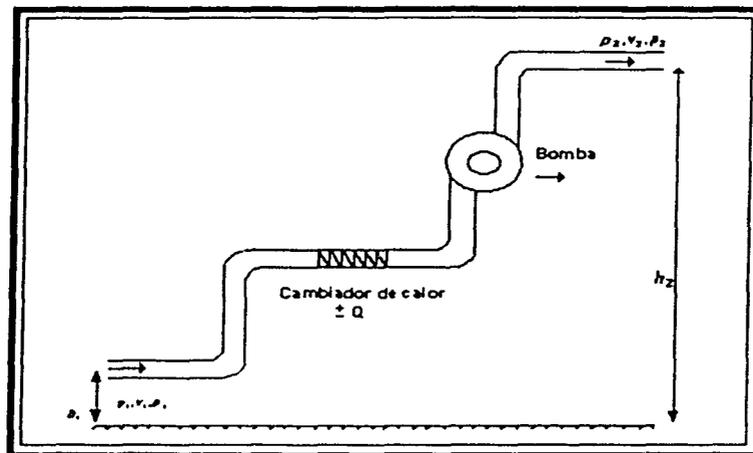


Fig. 2.1-. Diagrama de flujo en un conducto aislado

De acuerdo con la ley de la conservación de la energía:

$$E_1 + \Delta W_f + \Delta W_s = E_2 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

ΔW_f = Pérdidas de energía por fricción. Estas pérdidas corresponden a la fricción interna del fluido (viscosidad) y la fricción del fluido con las paredes rugosas de la tubería.

ΔW_s = Pérdidas de energía por trabajo externo.

E_1 = Energía por unidad de masa, en la posición uno $\left(\frac{lb_f - pie}{lb_m} \right)$

E_2 = Energía por unidad de masa, en la posición dos $\left(\frac{lb_f - pie}{lb_m}\right)$

E_e = Energía en expansión, esta energía esta dada por:

$$E_e = \left(\frac{lb_f - pie}{lb_m}\right) = P \left(\frac{lb_f}{pie^2}\right) V \left(\frac{pie^3}{lb_m}\right) = PV \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde: V = volumen específico

E_p = Energía potencial, su expresión es la siguiente:

$$E_p = \left(\frac{lb_f - pie}{lb_m}\right) = g \left(\frac{pie}{seg^2}\right) \frac{1}{g_c} \left(\frac{lb_f - seg^2}{lb_m - pie}\right) h (pie) = \frac{g}{g_c} h \quad (\text{Ec. 2.3})$$

E_c = Energía cinética, esta energía se expresa a continuación:

$$E_c \left(\frac{lb_f - pie}{lb_m}\right) = \frac{v^2}{2} \left(\frac{pie^2}{seg^2}\right) \frac{1}{g_c} \left(\frac{lb_f - seg^2}{lb_m - pie}\right) = \frac{v^2}{2 g_c} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

donde v = velocidad

Al sustituir las energías correspondientes a las posiciones 1 y 2 en la ecuación 2.1 se obtiene:

$$V \Delta P + \frac{g}{g_c} \Delta h + \frac{\Delta v^2}{2 g_c} + \Delta W_f + \Delta W_s = 0 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

donde: V = volumen específico medio del fluido $\left(v = \frac{1}{\rho}\right)$

Multiplicando la ecuación 2.5 por $\left(\frac{\rho}{\Delta L}\right)$ y considerando despreciable las pérdidas de energía por trabajo externo se tiene:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} + \rho \frac{g \Delta h}{g_c \Delta L} + \rho \frac{\Delta v^2}{2 g_c \Delta L} + \rho \frac{\Delta W_f}{\Delta L} = 0 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Considerando positiva la caída de presión en la dirección del flujo, se tiene:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \rho \frac{g \Delta h}{g_c \Delta L} + \rho \frac{\Delta v^2}{2 g_c \Delta L} + \rho \frac{\Delta W_f}{\Delta L} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

A esta ecuación se le acostumbra escribir de la siguiente forma:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_T = \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_e + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{ac} + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_f \quad (\text{Ec. 2.8})$$

donde:

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

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

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

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

Pérdidas de presión por fricción.

Las pérdidas de presión por fricción, en conductos circulares de diámetro constante, han sido determinadas experimentalmente por varios investigadores. Los resultados de esta experimentación, utilizando tuberías de diversos materiales, constituyen la base de las fórmulas que actualmente se usan.

Ecuación de Darcy.

Darcy, Weisbach y otros, en 1857, dedujeron experimentalmente la siguiente ecuación, expresada en unidades consistentes:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_f = \frac{f \rho v^2}{2 g_c d} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Una ecuación fue establecida posteriormente por Fanning, quien obtuvo valores de f cuatro veces menores que los de Darcy. Esta diferencia se debe al uso del radio hidráulico en lugar del diámetro de la tubería al formular su correlación.

Ecuación de Fanning.

La ecuación establecida por Fanning es:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_f = \frac{f \rho v^2}{2 g_c R_h} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

donde:

$$R_h = \text{radio hidráulico} = \frac{\text{área de la sección transversal}}{\text{perímetro mojado}} = \frac{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)}{\pi d} = \frac{d}{4}$$

por lo que la ecuación queda:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_f = \frac{2 f \rho v^2}{g_c d} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Factor de fricción.

El valor del factor de fricción (f) es función de la rugosidad de la tubería (ϵ) y del número de Reynolds (N_{Re}), esto es:

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

El número de Reynolds (adimensional) se define como:

$$N_{Re} = \frac{dv \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Rugosidad.

La rugosidad (ε) de una tubería, es una característica de su superficie, la cual está constituida por pliegues o crestas unidas, formando una superficie homogéneamente distribuida y depende del tipo de material que se empleó en su construcción.

En laboratorio, la determinación de la rugosidad se lleva a cabo a partir de la relación del área con respecto a la longitud de superficie de contacto con el fluido, bajo las siguientes condiciones de prueba:

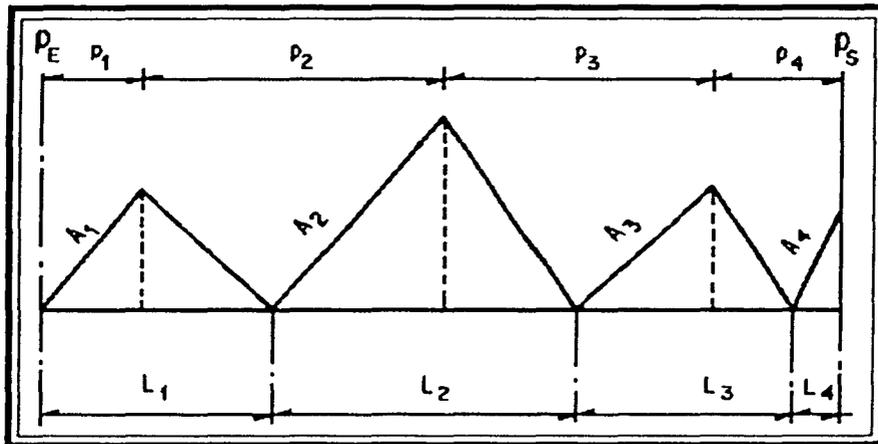


Fig. 2.2-. Esquema de rugosidades.

- Suponer constantes las propiedades del fluido.
- Mantener constante el gasto.
- P y T constantes a la entrada y salida del ducto de prueba.
- Se relacionará en forma directa la variación de la longitud con la rugosidad por medio de la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i}{\sum_{i=1}^n \Delta \left(\frac{r}{x_i} \right) L_i} \quad (\text{Ec. 2.13}) \quad \text{donde:} \quad \sum_{i=1}^n \Delta P_i = P_c - P_s \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Actualmente, se admite que la rugosidad puede expresarse por la altura media (ϵ) de dichos pliegues, al considerar las características de flujo.

Los valores más comunes empleados en la industria son:

Tipos de Tuberías		ϵ (pg)
Tuberías estriada.		0.00006
Tuberías de producción o perforación.		0.00060
Tuberías de escurrimiento.		0.00070
Tuberías galvanizadas.		0.00600

Tabla 2.1-. Valores de Rugosidad de distintos tipos de tuberías

Para calcular el valor de f , es necesario determinar el régimen de flujo. En conductos, los fluidos se mueven de acuerdo a cualquiera de los siguientes regímenes de flujo: laminar o turbulento. El flujo laminar ocurre cuando las partículas de fluido se mueven en líneas rectas paralelas al eje del conducto. A velocidades mayores, las partículas se mueven de una manera caótica, formando vórtices y remolinos; en este caso el flujo es turbulento. Osborne Reynolds estableció experimentalmente un parámetro para determinar el régimen de flujo en tuberías. A este parámetro el cual se calcula con la ecuación 2.12, se le conoce como número de Reynolds. El flujo laminar se presenta cuando $N_{Re} < 2300$ y el flujo turbulento cuando $N_{Re} > 3100$. Para flujo laminar en una sola fase, el factor de fricción depende exclusivamente del número de Reynolds y está dado por:

$$f = \frac{64}{N_{Re}} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Para flujo turbulento, el factor de fricción está dado por la ecuación de Colebrook y White:

$$f = \left[-2 \log \left(\frac{\epsilon}{3.715 d} + \frac{2.514}{\sqrt{f} N_{Re}} \right) \right]^{-2} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Se observa que para calcular f , en este caso, se requiere de un proceso iterativo. Basándose en la ecuación 2.16, Moody preparó un diagrama (fig. 2.3) para determinar el factor de

fricción en tuberías de rugosidad comercial. En este se nota lo siguiente:

- a) Para $N_{Re} < 2300$ (flujo laminar) f depende exclusivamente del número de Reynolds.
- b) A partir de $N_{Re} = 3100$, se indica la zona de transición. Dentro de esta, f depende tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa.
- c) La zona truncamente turbulenta se inicia a diferentes valores del número de Reynolds, dependiendo del valor de la rugosidad relativa. En esta zona f es independiente del número de Reynolds y varía únicamente con la rugosidad relativa. El valor de f puede obtenerse, para flujo turbulento, con:

$$f = \left(-2 \log \left(\frac{\epsilon}{3.715 d} \right) \right)^{-2} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

- d) Cuando el flujo es crítico ($2300 < N_{Re} < 3100$) el factor de fricción se puede aproximar con la siguiente expresión:

$$f = \frac{N_{Re} - 2300}{2300} \left[\frac{1.3521}{\left[2.3026 \log \left(\frac{f}{3.715 d} + \frac{2.516}{3100 \sqrt{f}} \right) \right]^2} \right] + 0.032 \quad (\text{Ec. 2.18})$$

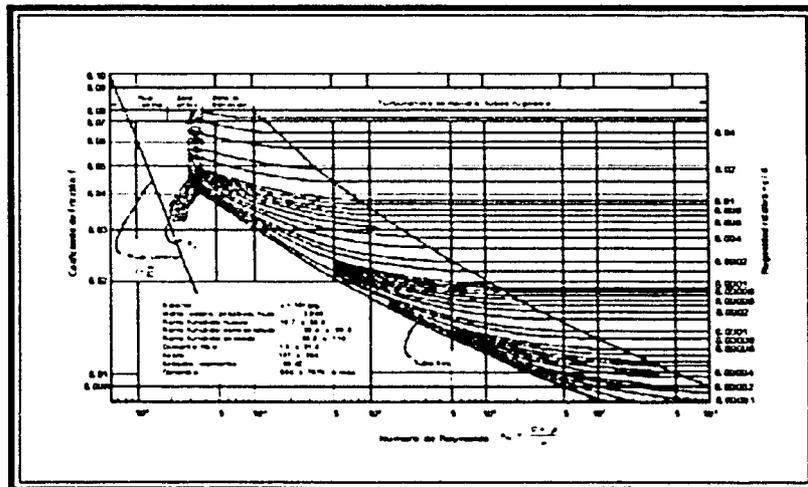


Fig. 2.3-. Diagrama de Moody.

Los valores de f , expresados en estas últimas cuatro ecuaciones se utilizarán, junto con la ecuación de Darcy, en el cálculo de las pérdidas de presión por fricción.

Como se indicó, el valor de f , para el flujo turbulento, es función también de la rugosidad ϵ . Para tuberías comerciales ϵ varía de 0.0006 a 0.0008 pg. Para tuberías de producción comúnmente se emplea un valor de $\epsilon = 0.0006$ y para líneas superficiales de 0.0006 a 0.00075 pg.

La siguiente ecuación permite obtener un valor de f bastante aproximado, cuando el régimen de flujo es turbulento ($N_{Re} > 3100$).

$$f = \left[1.14 - 2 \log \left(\frac{\epsilon}{d} + \frac{21.25}{N_{Re}^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Flujo de líquidos por tubería.

Ecuación general en unidades prácticas.

La ecuación 2.8 que expresa el gradiente de presión total, puede escribirse en la forma siguiente, al considerar despreciable el efecto de la aceleración.

$$\Delta P_T = \Delta P_e + \Delta P_f \quad (\text{Ec. 2.20})$$

La caída de presión por elevación es: $\Delta P_e = 0.433 \gamma_L \Delta h$ (Ec. 2.21)

donde: $\Delta P_e \left(\frac{lb}{pg^2} \right)$, γ_L (agua = 1.0) y Δh (pies)

La pérdida de presión por fricción, en unidades prácticas, se obtiene con la ecuación de Darcy:

$$\Delta P_f = f \frac{\rho' v'^2 L'}{2 g_c d'} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

$$\rho = 62.428 \gamma_L \quad (\text{Ec. 2.23})$$

$$v'^2 = \frac{4^2 q'^2}{\mu'^2 d'^4} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

$$\Delta P_f = 1.572768 f \frac{\gamma_L q'^2 L'}{d'^5} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Para emplear unidades prácticas se hacen las siguientes sustituciones:

$$d'^5 = d^5 (pg^5) \frac{1}{12^5} \left(\frac{pies^5}{pg^5} \right) \quad (\text{Ec. 2.26})$$

$$\Delta P'_f = \Delta P_f \left(\frac{lb}{pg^2} \right) 12^2 \left(\frac{pg^2}{pie^2} \right) \quad (\text{Ec. 2.27})$$

en la ecuación 2.25 queda:

$$\Delta P_f = 0.06056 \frac{f \gamma_L q'^2 L}{d^5} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

y además al sustituir las ecuaciones 2.28 y 2.21 en la ecuación 2.20 queda:

$$\Delta P_T = 0.433 \gamma_L \Delta h + 0.06056 \frac{f \gamma_L q'^2 L}{d^5} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

Número de Reynolds.

Es conveniente obtener una ecuación del número de Reynolds, en las que sus factores estén en unidades prácticas:

$$N_{Re} = \frac{d' v' \rho'}{\mu'} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

$$v' = \frac{4 q'}{\pi d'^2} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

$$N_{Re} = \frac{4 q' \rho'}{\pi \mu' d'} \quad (\text{Ec. 2.32})$$

$$q' = q \left(\frac{bl}{día} \right) 5.6142 \left(\frac{pies^3}{bl} \right) \frac{1}{86400} \left(\frac{día}{seg} \right) \quad (\text{Ec. 2.33})$$

$$\rho' = 62.428 \left(\frac{lb_w}{pie^3} \right) \gamma_L \frac{\left(\frac{lb_m}{pie^3} \right)}{\frac{lb_w}{pie^3}} \quad (\text{Ec. 2.34})$$

$$\mu' = \mu(cp) 0.00067197 \left(\frac{lb_m}{pie - seg - cp} \right) \quad (\text{Ec. 2.35})$$

$$d' = d(pg) \frac{1}{12} \left(\frac{pie}{pg} \right) \quad (\text{Ec. 2.36})$$

Haciendo la sustitución de la ecuación 2.33 a 2.36 en la ecuación 2.32 tenemos:

$$N_{Re} = 92.2 \frac{q\gamma_L}{d\mu} \quad (\text{Ec. 2.37})$$

Eficiencia de flujo.

Es obvio que la rugosidad de las tuberías dependerá del proceso empleado en su fabricación, su grado y tamaño. Aun las tuberías nuevas y con mayor razón las almacenadas, mostrarán valores aleatorios en su rugosidad. Los efectos de la corrosión, erosión e incrustamientos, que ocurren en las tuberías en operación, también afectan las condiciones de flujo. Por lo anterior, los gastos calculados mediante correlaciones raramente concuerdan con los medidos.

Para compensar esta imprecisión, generalmente se introduce en los cálculos un factor de eficiencia **E**. Este factor se define como *la fracción (o por ciento) del gasto total calculado al manejado realmente en una tubería*. Cuando se carece de datos de campo, la selección de **E** se basa en la experiencia; sin embargo, un valor de 0.90 es apropiado para los cálculos en el diseño de tuberías. Para calcular el gasto real de una línea, su gasto teórico se multiplica por el factor **E**.

Para corregir las pérdidas de presión calculadas, éstas se dividen entre la raíz cuadrada de **E**. Este procedimiento tiene el mismo efecto que cambiar el factor de fricción por un nuevo valor f/E^2 . Por lo tanto la ecuación 2.29 de acuerdo con lo expuesto queda:

$$\Delta P_r = 0.433 \gamma_L \Delta h + 0.06056 \left(\frac{f\gamma_L q^2 L}{E^2 d^5} \right) \quad (\text{Ec. 2.38})$$

Aplicación de la ecuación de flujo en el análisis y diseño de tubería que conducen líquidos.

La ecuación 2.38 permite calcular con aproximación aceptable la caída de presión en tubería que conduce líquidos; o bien, dada la caída de presión disponible, calcular el gasto o el diámetro. La ecuación es aplicable, tanto al caso de tubería superficial que conducen aceite (oleoductos), como al de pozos inyectoros de agua.

Ejemplo del cálculo de ΔP_f .

Calcular la caída de presión por fricción en una tubería de 3,000 (pies) de largo, 3.937 (pg) de diámetro interno y con una rugosidad (ϵ) de 0.0006 (pg), donde fluye aceite de densidad relativa de 0.9 y $\mu=46$ (cp), si el gasto es de: a) 2,500 (bl/día); b) 12,800 (bl/día).

Solución:

$$a) \quad L = (3000 \text{ pies}) \frac{1 \text{ milla}}{5,277 \text{ pies}} = 0.5685 \text{ millas}$$

$$N_{Re} = \frac{92.2 q \gamma_L}{d \mu} = \frac{(92.2)(2,560)(0.9)}{(3.937)(46)} = 1,173$$

Ya que el $N_{Re} < 2,300$, el flujo es laminar y f se calcula con la siguiente ecuación.

$$f = \frac{64}{N_{Re}} = \frac{64}{1,173} = 0.05456$$

$$\Delta P_f = 0.06056 \frac{f \gamma_L q^2 L}{d^5} = 0.06056 \frac{(0.05456)(0.9)(2,560)^2(0.5685)}{(3.937)^5} = 11.7 \text{ (lb / pg}^2\text{)}$$

b) Para el gasto de 12,800 (bl/día) se tiene:

$$N_{Re} = \frac{92.2 q \gamma_L}{d \mu} = \frac{(92.2)(12,800)(0.9)}{(3.937)(46)} = 5,865$$

Ya que $N_{Re} > 3,100$, el flujo es turbulento. El factor de fricción, se puede obtener con la siguiente expresión y procedimiento iterativo:

$$f_c = \left[-2 \log \left(\frac{\epsilon}{3.715 d} + \frac{2.514}{\sqrt{f_s} N_{Re}} \right) \right]^{-2} \quad (\text{Ec. 2.39})$$

Donde f_s es el valor supuesto y f_c es el calculado. Esta ecuación se aplica a partir de un valor supuesto de f , obteniéndose un valor mas aproximado. Si $|f_c - f_s| \leq$ tolerancia, f_c es el valor del factor de fricción buscado; en caso contrario, se hace $f_s = f_c$ y se repite el procedimiento.

Para este ejemplo:

$$f_c = \left[-2 \log \left(\frac{0.0006}{3.715 * 3.937} + \frac{2.514}{\sqrt{f_s} 5,865} \right) \right]^{-2}$$

$$f_c = \left[-2 \log \left(0.000041 + \frac{0.0004286}{\sqrt{f_s}} \right) \right]^{-2}$$

Iniciando con $f_s = 0.03$, se obtienen los resultados que se muestran a continuación:

ITERACIÓN	f_c
1	0.03700
2	0.03576
3	0.03596
4	0.03592
5	0.03593

Tabla 2.2-. Valores del factor de fricción calculado (f_c).

Por lo que:

$$\Delta P_f = 0.06056 \frac{f \gamma_L q^2 L}{d^5} = 0.06056 \frac{(0.03593)(0.9)(12,800)^2(0.5685)}{(3.937)^5} = 192.8 \text{ (lb / pg}^2\text{)}$$

Diseño de tubería.

La ecuación 2.38 puede aplicarse también para obtener el diámetro para un gasto y caída de presión dados.

El procedimiento de solución es iterativo, ya que el número de Reynolds (y por lo tanto el factor de fricción) es función del diámetro.

De dicha ecuación despejando d se obtiene:

$$d = \left[\frac{0.6056 f \gamma_L q^2 L}{E^2 (\Delta P_T - 0.433 \gamma_L \Delta h)} \right]^{0.2} \quad (\text{Ec. 2.40})$$

El gasto despejado de la misma ecuación es:

$$q = E \left[\frac{d^5 (\Delta P_T - 0.433 \gamma_L \Delta h)}{0.6056 f \gamma_L L} \right]^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.41})$$

Como se indicó, el proceso iterativo que se usa para resolver estas ecuaciones es el de sustituciones sucesivas; de la siguiente forma, para una iteración dada se supone como aproximación de la incógnita el valor calculado en la iteración anterior.

Las iteraciones se continúan, hasta que el cambio de la incógnita en una iteración, sea menor que la tolerancia establecida.

Se observa que es necesario realizar iteraciones al calcular el diámetro o el gasto y al calcular el factor de fricción cuando el flujo es turbulento.

De esto se desprende la conveniencia de usar calculadoras programables en la solución de problemas de diseño y análisis de tuberías horizontales, verticales o inclinadas.

Predicción del comportamiento de pozos inyectoros de agua.

La siguiente figura es un diagrama simplificado de un sistema de inyección de agua. Los elementos del sistema son:

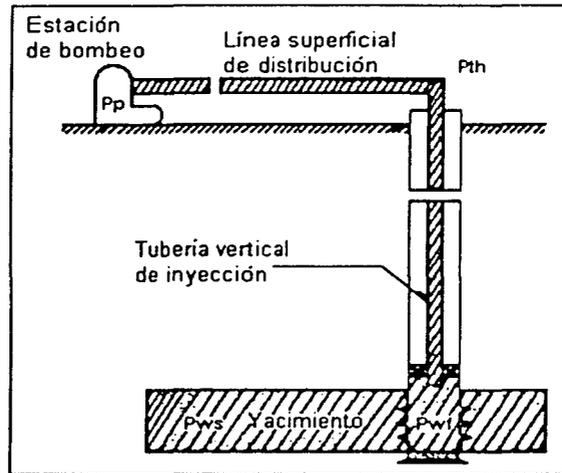


Fig. 2.4-. Diagrama simplificado de un sistema de inyección de agua.

- La estación de bombeo.
- La línea superficial de distribución.
- La tubería vertical de inyección.
- El yacimiento.

En la misma figura se distinguen los nodos y los puntos de unión de los elementos, en los que se tienen las presiones siguientes:

- P_p = Presión de la estación de bombeo.
- P_{th} = Presión en la boca del pozo.
- P_{wf} = Presión de fondo fluyendo (inyectado).
- P_{ws} = Presión estática (de fondo cerrado).

La predicción del comportamiento de un pozo inyector consiste esencialmente de la determinación de su capacidad de admisión (gasto de inyección) en función de la presión

disponible en la superficie y las características de las tuberías y del yacimiento. Los datos requeridos para resolver el problema planteado son:

- a) Presión de inyección en la estación de bombeo.
- b) Longitud, diámetro y cambio de nivel de la tubería superficial de distribución.
- c) Presión estática e índice de inyectividad del pozo.
- d) Características del fluido inyectado.

El procedimiento del cálculo consiste en:

- a) Suponer un gasto de inyección.
- b) Con la presión de bombeo y las características de la línea superficial, calcular la presión en la boca del pozo para el gasto supuesto.
- c) Con la presión en la boca calculada en el paso anterior y el mismo gasto, obtener la presión de fondo inyectado, teniendo en cuenta que el desnivel Δh (pies) corresponde al valor de la longitud de la tubería vertical de inyección L , que debe ser en millas.
- d) Con el índice de inyectividad del pozo, el gasto supuesto, y la presión de fondo calculada en el paso anterior, obtener la presión estática.

$$(P_{ws})_c = P_{wi} - \frac{i_w}{H} \quad (\text{Ec. 2.42})$$

- e) Comparar el valor de la presión estática calculada, con el valor real de dicha presión. Si estos valores coinciden, dentro de la tolerancia fijada el gasto supuesto en el primer punto es el correcto. En caso contrario, suponer otro gasto y repetir el procedimiento, hasta obtener la aproximación deseada.

Para simplificar los cálculos, es conveniente graficar valores de los gastos supuestos contra los de la presión estática calculada. Como se muestra en la siguiente figura.

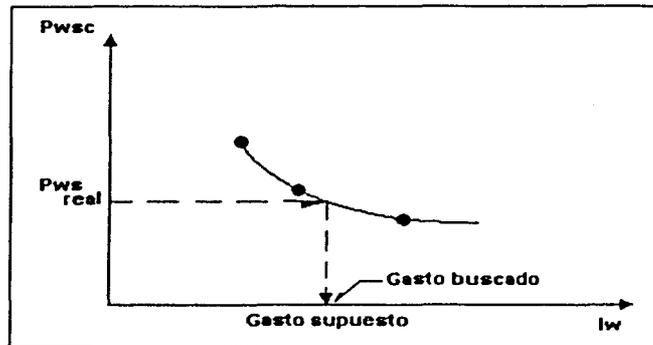


Fig.2.5-. Determinación gráfica del gasto correspondiente a un presión estática dada.

El procedimiento descrito permite obtener la presión en cada nodo, en función de las condiciones del flujo que prevalecen en los elementos del sistema. Por esta razón, el procedimiento se denomina como análisis nodal.

Con relación al comportamiento de un pozo inyector de agua, es importante considerar que su presión estática generalmente aumentará con el tiempo, debido a la propia inyección.

Por otra parte la formación puede sufrir daño, por las impurezas del agua o su incompatibilidad con la formación. Además, la movilidad del agua en la zona invadida, puede ser menor que la movilidad de los fluidos desplazados delante del frente de invasión.

El efecto de estas situaciones, es la disminución del índice de inyectividad. Por lo tanto, es conveniente determinar la capacidad de inyección del pozo considerando como variable la presión estática y el índice de inyectividad.

Es evidente que un análisis detallado permitirá determinar el efecto que sobre el gasto, tendrá el cambio de las tuberías y la presión de inyección.

Ejemplo de aplicación del análisis nodal.

Se desea determinar: a) El gasto de inyección de un pozo; y b) El efecto del cambio de la presión de bombeo de las tuberías, sobre su capacidad de admisión. Los datos del sistema son:

Para línea superficial:

$$\begin{aligned} \gamma_w &= 1.00 & L &= 2 \text{ (millas)} \\ \mu &= 1 \text{ (cp)} & E &= 0.90 \\ d &= 4 \text{ (pg)} & \varepsilon &= 0.0006 \text{ (pg)} \\ \Delta h &= + 20 \text{ (pies)} \end{aligned}$$

Para la tubería vertical de inyección:

$$\begin{aligned} \gamma_w &= 1.00 & L &= 2.273 \text{ (millas)} \\ \mu &= 0.8 \text{ (cp)} & E &= 0.90 \\ d &= 2.44 \text{ (pg)} & \varepsilon &= 0.0006 \text{ (pg)} \\ \Delta h &= - 12,000 \text{ (pies)} \end{aligned}$$

Otros datos son:

$$\begin{aligned} P_p &= 3,100 \text{ (lb/pg}^2\text{)} & II &= 3.521 \text{ (bl/día/lb/pg}^2\text{)} \\ P_{ws} &= 4,402 \text{ (lb/pg}^2\text{)} \end{aligned}$$

Solución:

a) Siguiendo el procedimiento descrito se obtienen los valores de P_{ws} , mostrados en la siguiente tabla:

CALCULO DEL GASTO DE INYECCION			
Gasto supuesto (bl/día)	P_m (lb/pg ²)	P_m (lb/pg ²)	P_{ws} (lb/pg ²)
6000	2997.8	7011.3	5307.2
8000	2932.5	6084.4	3812.3
10000	2851.0	4913.1	2073.0
7250	2959.0	6460.7	4401.6

Tabla 2.3-. Valores del gasto de inyección.

En la figura se muestran los valores anteriores graficados. Se observa que el gasto de inyección es de 7,250 (bl/día).

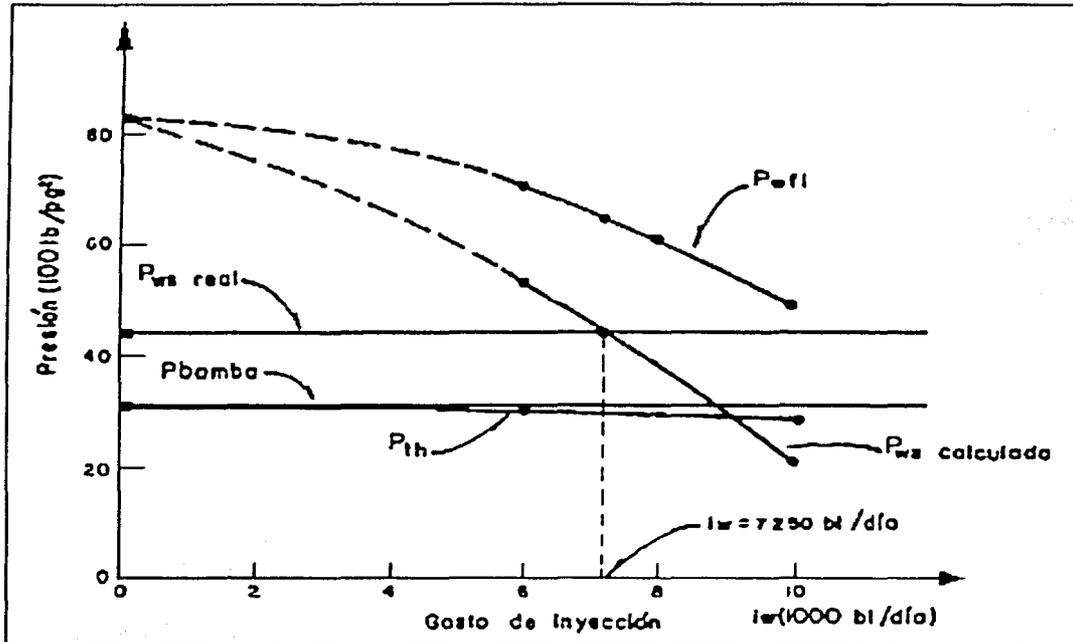


Fig. 2.6-. Aplicación del análisis nodal a pozos de inyección de agua.

b) En la siguiente tabla se presentan los valores de los gastos calculados, siguiendo el procedimiento enunciado, al suponer las tuberías de diferentes diámetros y presiones de bombeo variables, los resultados se muestran en las figuras.

EFECTO DE LAS TUBERÍAS Y LA PRESIÓN DE BOMBEO SOBRE EL GASTO DE INYECCIÓN					
P_b (pg)	i_w (bl/w)	P_b (pg)	i_w (bl/w)	P_b (pg)	i_w (bl/w)
2	4,690	2	5,105	2000	5710
3	6,765	3	9,422	3100	7250
4	7,250	4	11,400	4000	8375
5	7,365	5	12,050	5000	9530

Tabla 2.4-. Resultados de los gastos calculados.

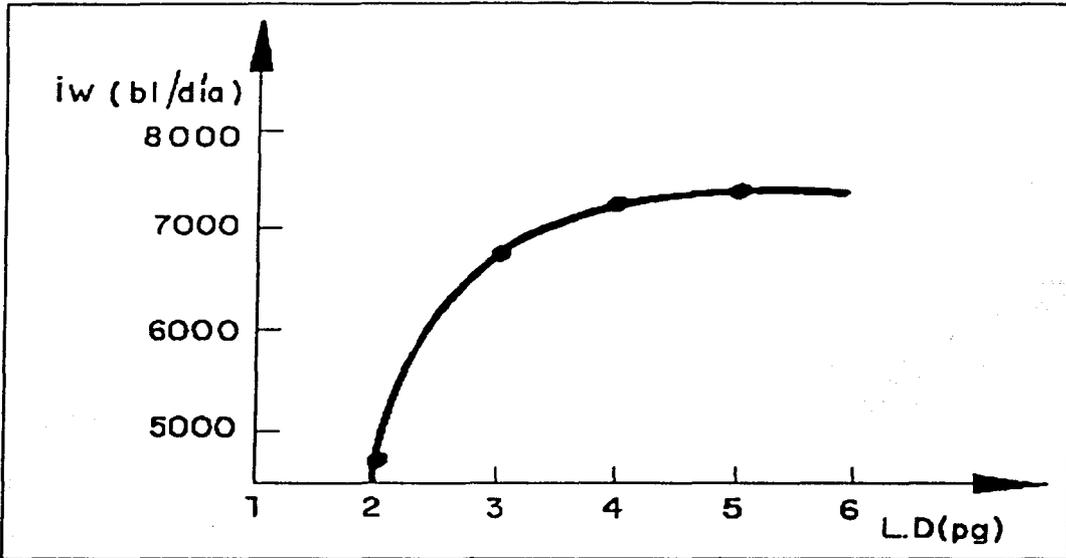


Fig. 2.7-. Relación entre el gasto de inyección y el diámetro de la línea de descarga.

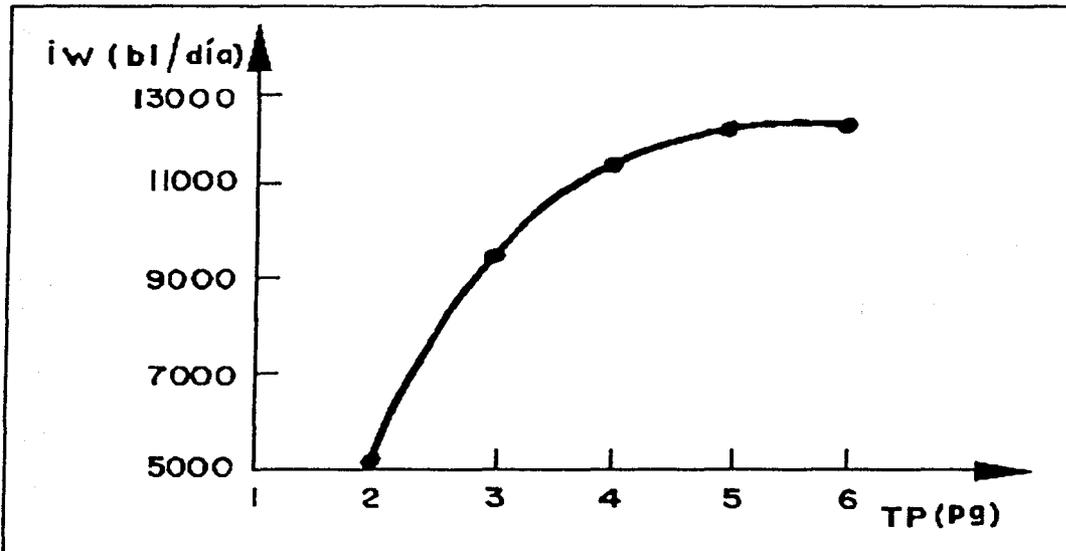


Fig. 2.8-. Variación del gasto de inyección al considerar tuberías de producción de diámetros diferentes.

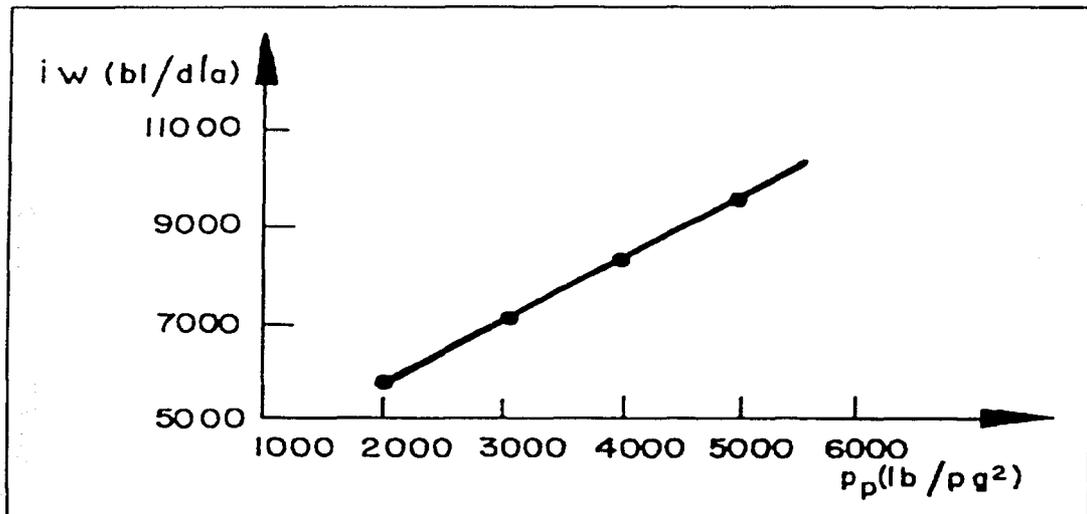


Fig. 2.9-. Relación entre el gasto de inyección y la presión de bombeo.

Es obvio que la selección de las tuberías debe basarse en un análisis económico, en el que se comparen los incrementos en el gasto, al instalar tuberías de mayor diámetro, con la inversión adicional que es necesario realizar.

Pérdidas por fricción en las conexiones.

Los codos, las válvulas y las conexiones, así como otros tipos de aditamentos, incrementan las pérdidas de presión por fricción en el sistema. En el mejor de los casos, estas pérdidas adicionales de presión solo pueden ser estimadas en forma aproximada. Ellas deben incluirse en el análisis de un sistema, considerando que cada conexión es sustituida por una longitud equivalente de tubería recta (L_e), la cual producirá la misma pérdida de presión por fricción que la conexión real. La longitud equivalente de cada conexión se agrega a la longitud axial de la tubería (L), antes de calcular la pérdida total en el sistema. Los valores aproximados de L_e , para las válvulas comunes y otras conexiones, para flujo turbulento, pueden obtenerse mediante el nomograma que se muestra en la siguiente figura.

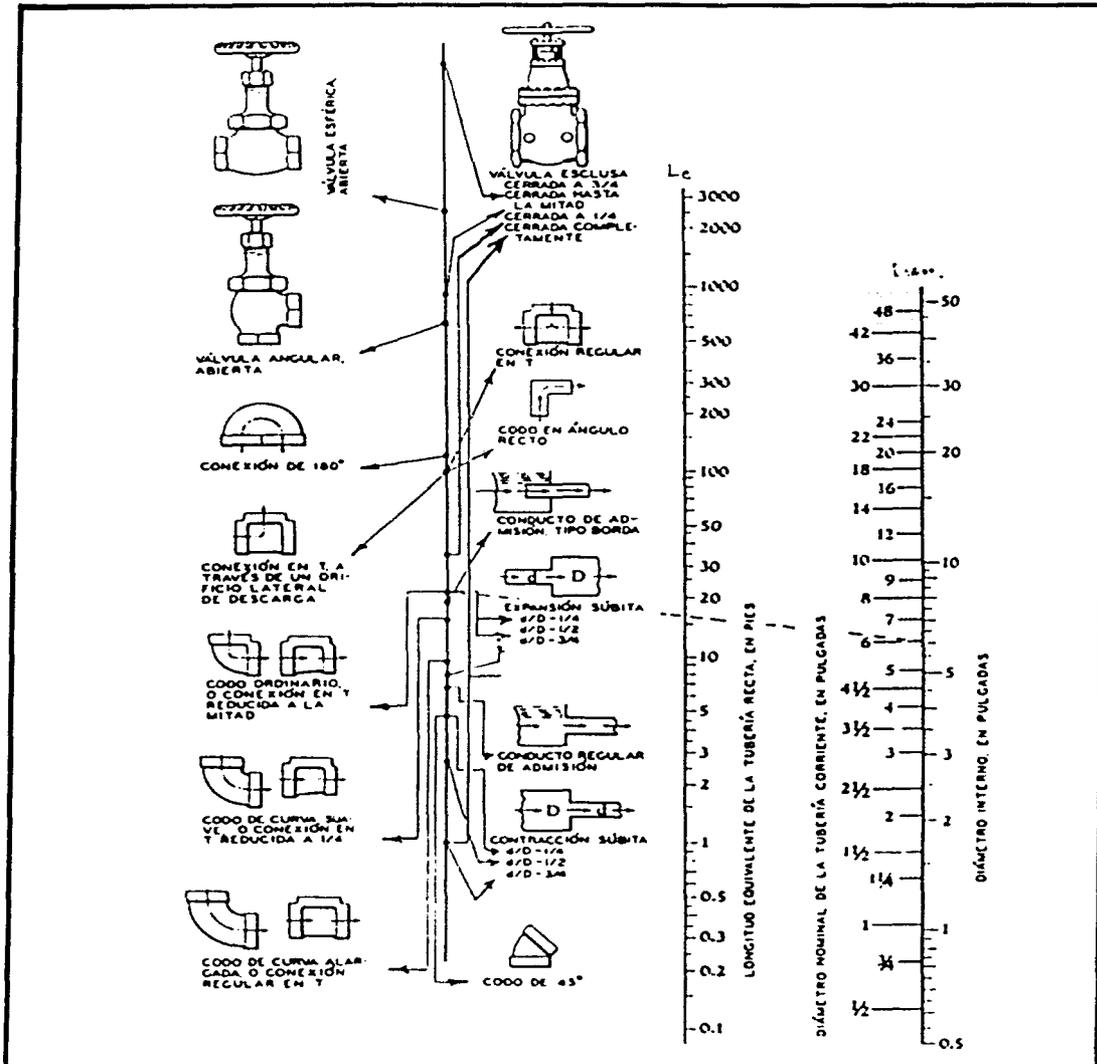


Fig. 2.10-. Nomograma para determinar la caída de presión, en función de la longitud equivalente de una tubería recta, cuando se tienen válvulas, codos y conexiones como las que aquí se muestran (Cortesía de Crane Co.).

Por ejemplo, un codo de 2 (pg), en ángulo recto, es equivalente a 12 (pies) de una tubería recta. Para flujo multifásico las longitudes equivalentes deberán multiplicarse por seis.

Flujo de gas por tubería y estranguladores.

Ecuación general de energía en unidades prácticas.

De la ecuación 2.8 las pérdidas de presión por fricción se expresan según Darcy, como:

$$\Delta' P_f = f \frac{\rho L' v^2}{2 g_c d'} \quad (\text{Ec. 2.43})$$

donde:

$$\rho_s = \frac{0.0764 \gamma_s}{B_s} \quad (\text{Ec. 2.44})$$

$$\bar{B}_s = \left(\frac{P_o}{T_o + 460} \right) \frac{\bar{Z} (\bar{T} + 460)}{\bar{P}} \quad (\text{Ec. 2.45})$$

$$\bar{v} = \frac{q'}{A} = \frac{4 q' \bar{B}_s}{\pi d'^2} \quad (\text{Ec. 2.46})$$

$$\bar{v}^2 = 1.6211 \frac{q'^2 \bar{B}_s^2}{d'^4} \quad (\text{Ec. 2.47})$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.44 y 2.47 en 2.43 tenemos:

$$\Delta' P_f = f \frac{(0.0764 \gamma_s)(1.6211 q'^2 \bar{B}_s^2) L'}{2 g_c \bar{B}_s d'^5} \quad (\text{Ec. 2.48})$$

$$\text{Simplificando tenemos: } \Delta P'_f = \left(\frac{f}{519.98} \right) \frac{\gamma_s q'^2 \bar{B}_s L'}{d'^5} \quad (\text{Ec. 2.49})$$

sustituyendo 2.45 en la ecuación anterior (2.49):

$$\Delta P'_f = \left(\frac{f}{519.98} \right) \left(\frac{P_o}{T_o + 460} \right) \frac{q'^2 \gamma_s \bar{Z} (\bar{T} + 460) L'}{d'^5 \bar{P}} \quad (\text{Ec. 2.50})$$

Hasta aquí, los términos de esta ecuación, excepto P, están en unidades consistentes, esto es:

$$\begin{aligned}\Delta P'_f &= (\text{lb}/\text{pie}^2) \\ \bar{P} &= (\text{lb}/\text{pg}^2_{\text{abs}}) \\ \bar{T} &= (\text{F}^\circ)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}q' &= (\text{pies}^3/\text{seg}) \\ L' &= (\text{pies}) \\ d' &= (\text{pies})\end{aligned}$$

Y las sustituciones en las unidades prácticas, se hacen en la forma siguiente:

$$\Delta P' \left(\frac{\text{lb}}{\text{pie}^2} \right) = \Delta P \left(\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \right) 144 \left(\frac{\text{pg}^2}{\text{pie}^2} \right) \quad (\text{Ec. 2.51})$$

$$q'^2 \left(\frac{\text{pies}^3}{\text{seg}} \right)^2 = q^2 \left(\frac{\text{pies}^3}{\text{día}} \right)^2 \frac{1}{86400^2} \left(\frac{\text{día}}{\text{seg}} \right)^2 \quad (\text{Ec. 2.52})$$

$$L' (\text{pies}) = L (\text{millas}) 5277 \left(\frac{\text{pies}}{\text{milla}} \right) \quad (\text{Ec. 2.53})$$

$$d' (\text{pies}) = d (\text{pg}) \frac{1}{12^5} \left(\frac{\text{pies}}{\text{pg}} \right)^5 \quad (\text{Ec. 2.54})$$

y además: $\bar{P} = \frac{(P_1 + P_2)}{2}$ y $\Delta P = P_1 - P_2$, por tanto, haciendo las sustituciones anteriores en la ecuación 2.50 se obtiene:

$$(P_1^2 - P_2^2) = \left(\frac{f}{461.346^2} \right) \left(\frac{P_0}{(T_0 + 460)} \right) \left(\frac{\bar{Z} q^2 \gamma_s (\bar{T} + 460) L}{d^5} \right) \quad (\text{Ec. 2.55})$$

Que es la ecuación que permite evaluar las pérdidas de presión por fricción en gasoductos horizontales.

De la ecuación 2.3, las pérdidas de presión debido al cambio de elevación se expresan de la siguiente forma:

$$\Delta P_e = \bar{\rho} h \quad (\text{Ec. 2.56})$$

De las ecuaciones 2.44 y 2.45 y usando unidades prácticas, se tiene que:

$$\Delta P_e = \left(\frac{2.7044}{144} \right) \frac{\bar{P} \gamma_s}{\bar{Z} (\bar{T} + 460)} \quad (\text{Ec. 2.57})$$

y como, $\Delta P_e = P_1 - P_2$ la ecuación anterior queda:

$$P_1 - P_2 = 0.01878 \frac{\bar{P} \gamma_s h}{Z(\bar{T} + 460)} \quad (\text{Ec. 2.58})$$

multiplicando ambos miembros por: $\frac{(P_1 + P_2)}{2}$; se obtiene finalmente:

$$(P_1^2 - P_2^2) = 0.03756 \frac{\bar{P}^2 \gamma_s h}{Z(\bar{T} + 460)} \quad (\text{Ec. 2.59})$$

que es la ecuación que permite cuantificar exclusivamente las pérdidas de presión por elevación.

Con la ecuación 2.59 se puede determinar la P_{ws} cuyo conocimiento permitirá analizar las condiciones de flujo, tanto del yacimiento como de la tubería vertical y normar con esto, el criterio de elección del aparejo del pozo. Esto siempre es posible si la presión en el pozo se encuentra estabilizada. La solución de esta expresión es por ensaye y error y puede resumirse en el siguiente algoritmo.

1. Recopilar la siguiente información: γ_g , h , \bar{T} y P_{th} .
2. Suponer una P_{ws} .
3. Obtener la $\bar{P} = \frac{(P_1 + P_2)}{2}$
4. Determinar Z a \bar{P} y \bar{T}
5. Calcular el nuevo valor de P_{ws} .
6. Si la diferencia entre P_{ws} supuesta y calculada se encuentra dentro de la tolerancia preestablecida, el valor de la P_{ws} supuesto es correcto. En caso contrario se asume el valor calculado como supuesto y se repiten los pasos 3 a 6, hasta obtener la aproximación establecida.

Ejemplo.

Calcular la presión de fondo de un pozo cerrado, dadas las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} T &= 140 \text{ (}^\circ\text{F)} & h &= 6320 \text{ (pies)} \\ P_{th} &= 1920 \text{ (lb/pg}^2_{abs}) & \gamma_g &= 0.85 \end{aligned}$$

Despejando de la ecuación $(P_1^2 - P_2^2) = 0.03756 \frac{\bar{P}^2 \gamma_g h}{Z(\bar{T} + 460)}$ el término correspondiente a P_{wf} , que en este caso se considerará igual a P_{ws} .

$$P_{ws}^2 = P_{th}^2 + \frac{0.03756 \gamma_g \bar{P}^2 h}{Z(\bar{T} + 460)} \quad (\text{Ec. 2.60})$$

y aplicando el algoritmo anterior tenemos:

$$P_{ws} = 2459.3 \text{ (lb/pg}^2_{abs})$$

En el caso de un pozo productor de gas, la P_{wf} será mayor que la P_{th} debido a los efectos combinados de ambas pérdidas de presión consideradas. En pozos inyectoros, las pérdidas por fricción pueden predominar sobre las de elevación, por lo que en este caso, la P_{wf} será menor que la P_{th} .

$$\text{Sumando las ecuaciones } (P_1^2 - P_2^2) = \left(\frac{f}{461.346^2} \right) \left(\frac{P_o}{T_o + 460} \right) \left(\frac{Z q^2 \gamma_g (\bar{T} + 460) L}{d^5} \right)$$

Y $(P_1^2 - P_2^2) = 0.03756 \frac{\bar{P}^2 \gamma_g h}{Z(\bar{T} + 460)}$ se obtiene la ecuación:

$$P_1^2 - P_2^2 = \left(\frac{f}{461.346^2} \right) \left(\frac{P_o}{T_o + 460} \right) \left(\frac{q^2 \gamma_g Z (\bar{T} + 460) L}{d^5} \right) + 0.03756 \frac{\bar{P}^2 \gamma_g h}{Z(\bar{T} + 460)} \quad (\text{Ec. 2.61})$$

para calcular P_1 y P_2 en unidades prácticas y bajo las siguientes suposiciones:

1. Flujo de régimen permanente.
2. Flujo en una sola fase.
3. Energía cinética despreciable.

o para determinar el gasto:

$$q_g = \frac{K_4}{L^{0.5}} \left[P_1^2 - P_2^2 - \left(\frac{0.03756 \bar{P}^2 \gamma_g h}{Z(\bar{T} + 460)} \right) \right]^{0.5} d^{2.5} \quad (\text{Ec. 2.62})$$

donde:

$$K_4 = 461.346^2 \left(\frac{T_0 + 460}{P_0} \right)^{0.5} \left(\frac{1}{f \gamma_g Z (\bar{T} + 460)} \right)^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.63})$$

o bien, el diámetro:

$$d = \left[\left(\frac{L}{K_4} \right) \left(\frac{1}{P_1^2 - P_2^2 - \left(\frac{0.03756 \bar{P}^2 \gamma_g h}{Z(\bar{T} + 460)} \right)} \right) q_g^2 \right]^{0.2} \quad (\text{Ec. 2.64})$$

no obstante que la ecuación 2.61, se deriva de un análisis de energía y por ende su aplicación es general, numerosos autores (Clinedinst, Panhandle, Weymouth, etc.) han presentado diversas ecuaciones para calcular el flujo de gas a través de tuberías.

Número de Reynolds.

Al igual que para el flujo de líquidos por tuberías, es conveniente obtener una ecuación del número de Reynolds para flujo de gas, en la que sus factores estén en unidades prácticas, por lo que al sustituir las ecuaciones 2.65, 2.66 y 2.67 en la ecuación 2.30 tenemos:

$$\rho_g = \frac{0.0764 \gamma_g}{B_g} \quad (\text{Ec. 2.65})$$

$$v = \frac{4 q'_g B_g}{\pi d^2} \quad (\text{Ec. 2.66})$$

$$B_g = \frac{0.02825 Z (T + 460)}{P} \quad (\text{Ec. 2.67})$$

$$N_{Re} = 0.0201056 \frac{q_g \gamma_g}{d \mu_g} \quad (\text{Ec. 2.68})$$

Flujo de gas por conductos anulares.

En la mayoría de los casos, los pozos de gas producen por el interior de la tubería de producción, por tanto la ecuación 2.61, no sufre modificaciones; sin embargo, cuando el gas fluye por el espacio anular, deberá considerarse el diámetro hidráulico en la ecuación de flujo como se deduce a continuación:

El diámetro hidráulico d_h , es igual a cuatro veces el área de la sección transversal al flujo entre el perímetro mojado esto es:

$$d_h = 4 R_h \tag{Ec. 2.69}$$

que para flujo anular y en unidades consistentes, se expresa como:

$$d_h = 4 \left[\frac{\frac{\pi}{4} (d_{ci}^2 - d_{ie}^2)}{\pi (d_{ci} + d_{ie})} \right] = d_{ci} - d_{ie} \tag{Ec. 2.70}$$

Por otra parte de la ecuación $\Delta P = f \frac{\rho' L v^2}{2 g_c d}$ donde:

$$v = \frac{q}{A} \left(\frac{\text{pies}}{\text{seg}} \right) \tag{Ec. 2.71} \quad \text{y} \quad A = \frac{\pi (d_o^2 - d_i^2)}{4 * 144} \text{ (pies}^2\text{)} \tag{Ec. 2.72}$$

empleando unidades prácticas para q y d , se tiene:

$$v = \frac{q_r \bar{Z} P_o (\bar{T} + 460)}{86400 \bar{P} (\bar{T}_o + 460)} \left(\frac{1}{\frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{d_{ci}}{12} \right)^2 - \left(\frac{d_{ie}}{12} \right)^2 \right]} \right) \tag{Ec. 2.73}$$

si $P_o = 14.7 \left(\frac{\text{lb}}{\text{pg}^2} \text{abs} \right)$ y $T_o = 60 (^{\circ}F)$ entonces:

$$v = \left(\frac{1}{129 .111^2} \right) \frac{q_r \bar{Z} (\bar{T} + 460)}{\bar{P} (d_{ci}^2 - d_{ie}^2)} \tag{Ec. 2.74}$$

sustituyendo la ecuación 2.74 en la 2.9 y simplificando tenemos:

$$\Delta P = 0.0263802 \left(\frac{f q_{\epsilon}^2 \gamma_{\epsilon} \bar{Z} (\bar{T} + 460)}{\bar{P} [(d_{ci}^2 - d_{ce}^2)^2 (d_{ci} - d_{ce})]} \right) \quad (\text{Ec. 2.75})$$

donde: $(d_{ci}^2 - d_{ce}^2)^2 (d_{ci} - d_{ce}) = (d_{ci} - d_{ce})^3 (d_{ci} + d_{ce})^2$ es el diámetro equivalente para flujo por espacio anular. Para este caso la ecuación 2.61 toma la siguiente forma:

$$P_1^2 - P_2^2 = \left(\frac{f}{461.346^2} \right) \left(\frac{P_0}{T_0 + 460} \right) \left(\frac{q_{\epsilon}^2 \gamma_{\epsilon} \bar{Z} (\bar{T} + 460) L}{(d_{ci} - d_{ce})^3 (d_{ci} + d_{ce})^2} \right) + 0.03756 \frac{\bar{P}^2 \gamma_{\epsilon} h}{\bar{Z} (\bar{T} + 460)} \quad (\text{Ec. 2.76})$$

Número de Reynolds en conductos anulares.

Para la determinación del número de Reynolds por flujo anular tampoco se admite sustitución directa del diámetro hidráulico, sin embargo puede aproximarse la siguiente forma:

$$N_{Re} = 0.0201056 \frac{q_{\epsilon} \gamma_{\epsilon}}{\mu (d_{ci} + d_{ce})} \quad (\text{Ec. 2.77})$$

d_{ci} = Diámetro interior de la T.R. (pg)

d_{ce} = Diámetro exterior de la T.P. (pg)

Aspectos a considerar en la aplicación de la ecuación general de energía.

El factor de fricción.

Como la viscosidad del gas es baja y se manejan comúnmente gasto altos, el régimen de flujo es normalmente turbulento, por lo que el valor de f es:

$$f = \left(-2 \log \left(\frac{3.715 d}{\epsilon} \right) \right)^{-2} \quad (\text{Ec. 2.78})$$

El nivel base.

Al emplear las ecuaciones:

$$P_1^2 - P_2^2 = \left(\frac{f}{461.346^2} \right) \left(\frac{P_0}{T_0 + 460} \right) \left(\frac{q_s^2 \gamma_s \bar{Z} (\bar{T} + 460) L}{d^5} \right) + 0.03756 \frac{\bar{P}^2 \gamma_s h}{\bar{Z} (\bar{T} + 460)} \quad (\text{Ec. 2.61})$$

$$q_s = \frac{K_4}{L^{0.5}} \left[P_1^2 - P_2^2 - \left(\frac{0.03756 \bar{P}^2 \gamma_s h}{\bar{Z} (\bar{T} + 460)} \right) \right]^{0.5} d^{2.5} \quad (\text{Ec. 2.62})$$

$$K_4 = 461.346^2 \left(\frac{T_0 + 460}{P_0} \right)^{0.5} \left(\frac{1}{f \gamma_s \bar{Z} (\bar{T} + 460)} \right)^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.63})$$

Se debe tener cuidado en la determinación del signo de h, esto significa que la diferencia de alturas entre la descarga y la entrada de una tubería, se debe referir a un nivel base y se considera el sentido positivo hacia arriba. Así, para un pozo inyector, en el que la entrada esta en la superficie y la descarga en el fondo, a una profundidad **D**, la altura de la entrada respecto al nivel base, fijado en la superficie, es cero y la de la descarga referida al mismo nivel es **-D**, de tal manera que: $h = h_D - h_{nb} = -D - 0 = -D$.

Lo mismo se obtiene si el nivel base es la profundidad **D**. En este caso $h_D = 0$ y $h_{nb} = D$, esto es: $h = h_D - h_{nb} = 0 - D = -D$, esto se visualiza de una manera más clara con la siguiente tabla:

POZO	P_1 (Presión conocida)	SIGNO D	SIGNO h	P_2 (Presión calculada)
Productor (flujo ascendente)	P_{th}	+	+	P_{wf}
	P_{wf}	-	-	P_{th}
Inyector (flujo descendente)	P_{th}	-	+	P_{wf}
	P_{wf}	+	-	P_{th}

Tabla 2.5.- Tabla para determinar el signo del nivel base.

La aplicación de la ecuación 2.61, puede por tanto hacerse en pozos (verticales o direccionales) o en gasoductos, en cuyo caso, si el flujo es ascendente, P_{th} será la presión de descarga (P_2) y P_{wr} la presión de entrada (P_1) y en forma inversa, si el flujo es descendente.

Método de solución para las ecuaciones de flujo.

El procedimiento para resolver la mayoría de las ecuaciones conocidas, es de tipo iterativo, pues \bar{P} , Z y f dependen de la presión y f además, de las siguientes variables N_{Re} , ϵ y d de la tubería. El proceso iterativo recomendado para resolver la ecuación 2.62, es el de aproximaciones sucesivas.

La presión media.

Como la distribución de presiones en un gasoducto no es lineal, se recomienda el uso de la siguiente ecuación para obtener la presión media.

$$\bar{P} = \frac{2}{3} \left[\frac{P_1^3 - P_2^3}{P_1^2 - P_2^2} \right] \quad (\text{Ec. 2.79})$$

Eficiencia de flujo.

Al igual que en el flujo de líquidos por tuberías, la eficiencia es factor de ajuste para compensar los efectos de corrosión, erosión, rugosidad e incrustaciones, que no se consideran en la deducción de las ecuaciones de flujo, de tal forma que los resultados que se obtengan deben ser corregidos para obtener el gasto real.

Línea	Contenido de líquidos (gal/10 ⁶ pies ³)	E
Gas seco	0.1	0.92
Gas húmedo	7.2	0.77
Gas y Condensado	800	0.60

Tabla 2.6-. Valores más comunes de E para flujo de gas.
(según Ikoku)

Sistemas complejos de transporte y recolección.

Hasta aquí sólo se ha presentado flujo de gas a través de una tubería de diámetro constante a lo largo de toda su longitud, pero esto es muy raro de encontrar en un sistema real de transporte, ya que la mayoría de ellos están compuestos por varias secciones de tuberías de diferentes diámetros, o bien, por varias líneas paralelas entre sí. Como resultado se encuentran en la práctica los sistemas complejos de tuberías.

Tuberías en serie.

Si una línea de transporte o recolección se constituye de secciones de diámetro diferentes, el gasto se puede obtener al determinar las longitudes equivalentes a un diámetro común, o bien, en diámetros equivalentes a una longitud común. A partir de este razonamiento se pueden obtener las dimensiones de una sola línea con un gasto equivalente del sistema original.

La suposición única para desarrollar este concepto es que se consideran constantes todos los términos de las ecuaciones, excepto L , d y f encontrándose la siguiente expresión general:

$$L_E = \frac{d^{a_1}}{f} \sum_{i=1}^n \frac{L_i f_i}{d_i^{a_1}} \quad (\text{Ec. 2.80})$$

donde: $a_1 = 2.5$ (tuberías en serie y paralelo).
 $a_2 = 0.5$ (tuberías en paralelo).

Ejemplo: Determinese la longitud equivalente de una tubería en serie con los datos de la siguiente figura:

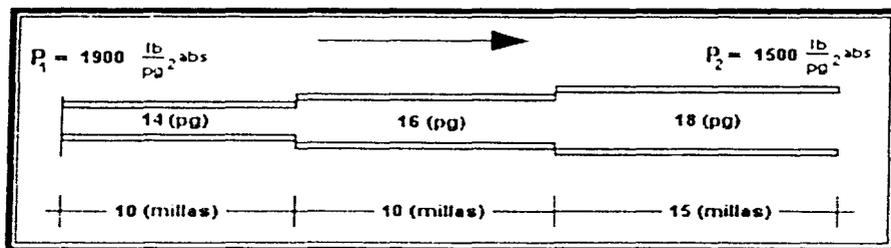


Fig. 2.11-. Esquema de un sistema de transporte en serie.

Solución: Suponiendo una $\epsilon=0.0006$, los valores de f para cada sección suponiendo flujo completamente turbulento son:

$$\begin{aligned}f_1 &= 0.010253 \\f_2 &= 0.010016 \\f_3 &= 0.009814\end{aligned}$$

Escogiendo la línea de 16 (pg) como referencia y empleando la siguiente ecuación tenemos:

$$L_E = \frac{d^{a1}}{f} \sum_{i=1}^n \frac{L_i f_i}{d_i^{a1}} = \frac{(16)^{2.5}}{0.010016} \left[\frac{(10)(0.010253)}{(14)^{2.5}} + \frac{(15)(0.009814)}{(18)^{2.5}} \right] + 10$$

$$L_E = 27.92 \text{ (millas)}$$

Este resultado indica que una tubería de 16 (pg) con longitud de 27.92 (millas), entregará el mismo gasto y producirá las mismas pérdidas de energía que el sistema al que sustituiría.

Tuberías en paralelo.

En un sistema de tuberías en paralelo, se tienen las mismas pérdidas de presión en cada una de las ramas y el gasto total equivalente de la suma de los gastos de cada rama, o lo que es lo mismo, a obtener un diámetro equivalente al número de ramas consideradas. La expresión para evaluar el gasto total es:

$$q_T = C \sum_{i=1}^n \frac{d_i^{a1}}{f_i^{a2}} \quad (\text{Ec. 2.81})$$

donde C representa todas las variables de la ecuación de flujo excepto el diámetro y factor de fricción, análogamente para hallar un diámetro equivalente tenemos:

$$d_E = \left[\left(\frac{f_p}{f_o} \right)^{a2} \sum_{i=1}^n d_i^{a1} \right] \quad (\text{Ec. 2.82})$$

si se desea determinar la longitud de una línea paralela que satisfaga los aumentos de demanda, puede emplearse la siguiente expresión:

$$q_2 = \frac{q_1}{\left[1 + x \left(\frac{1}{(1+Y)^2} - 1 \right) \right]^{0.5}} \quad (\text{Ec. 2.83})$$

donde: $Y = \left(\frac{d_p}{d_o} \right)^{a1} \left(\frac{f_o}{f_p} \right)^{a2}$ (Ec. 2.84)

- q_1 : Gasto antes de efectuar la instalación (pies³_o/dia @ cs).
- q_2 : Gasto después de efectuada la instalación (pies³_o/dia @ cs).
- x : Fracción de la línea original que se va a conectar a la nueva tubería.
- d_p : Diámetro interior de la línea paralela (pg).
- d_o : Diámetro interior de la línea origina (pg).
- f_o : Factor de fricción de la línea original.
- f_p : Factor de fricción de la línea paralela.

Ejemplo: Obtener la longitud equivalente de un sistema en paralelo como el de la siguiente figura.

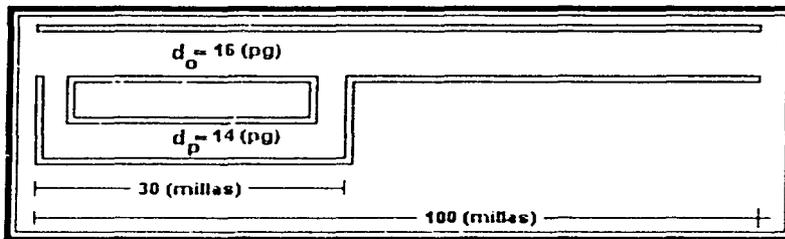


Fig. 2.12-.Esquema de un sistema de transporte en paralelo

Solución: Convirtiendo la sección en paralelo de 30 (millas), en una sola línea a un diámetro equivalente de las dos líneas consideradas, se tiene de la ecuación:

$$d_E = \left[\left(\frac{f_p}{f_o} \right)^{a2} \sum_{i=1}^n d_i^{a1} \right] = 1778 .0348 \quad (\text{millas})$$

en estas condiciones el sistema es ahora de dos secciones en serie, una de 30 (millas) y otra de 70 (millas); aplicando el procedimiento del ejemplo anterior, se tiene que:

$$L_E = 156.23 \quad (\text{millas})$$

con un diámetro de tubería de 19.95 (pg); o bien:

$$L_E = 86.64 \text{ (millas)}$$

con una tubería de 16 (pg).

Presencia de Condensados.

En las ecuaciones de flujo presentadas, se ha considerado flujo de una sola fase, esto significa que será necesario efectuar una corrección a la densidad del gas, por la presencia de condensados del gas de la corriente de flujo, y poder efectuar así una evaluación mas precisa de las caídas de presión. Por regla general la evaluación de tal efecto se obtiene a través de alguna correlación de flujo multifásico; sin embargo, aplicando la corrección mencionada a la densidad del gas pueden obtenerse resultados aceptables.

Peffer y Miller, presentaron en 1986 una serie de ecuaciones, de diversos autores, que permiten corregir la densidad del gas a la apropiada densidad de la mezcla. Aún y cuando su objetivo era el de determinar la presión de fondo en pozos de gas, puede emplearse como una buena aproximación en líneas superficiales. Este método es recomendable para $R_L \geq 3900$ (pies³/bl), en caso contrario deberá usarse una correlación de flujo multifásico.

donde: R_L : Relación gas - líquido (pies³/bl)

Ecuación de Razaza y Katz, para corregir γ_g por presencia de condensados:

$$\gamma_{wg} = \frac{\gamma_g + \frac{4584 \gamma_o}{R_L}}{1 + \frac{132800 \gamma_o}{M_o R_L}} \quad (\text{Ec. 2.85})$$

donde: γ_{wg} : densidad de la corriente de flujo
 M_o : peso molecular del condensado

$$M_o = \frac{6084}{\text{API} - 5.9} = \frac{44.29 \gamma_o}{1.03 - \gamma_o} \quad (\text{Ec. 2.86})$$

para calcular el factor Z se utilizara γ_{wg} en ves de γ_g .

Ecuación de Vitter para corregir γ_g por presencia de agua y condensados:

$$\gamma_{MIX} = \frac{\gamma_g + \frac{4591 \gamma_L}{R_L}}{1 + \frac{1123 \gamma_o}{R_L}} \quad (\text{Ec. 2.87})$$

donde: γ_L : densidad ponderada, por agua y condensados
 R_L : relación gas - líquido (pies³_g/bl)

Ecuación de Ikoku para ajustar el gasto de gas por presencia de líquidos:

$$GE_o = \frac{133037 \gamma_o}{M_o} \quad (\text{Ec. 2.88})$$

donde: GE_o : equivalente en gas del condensado (pies³_g @ cs/bl) por tanto, el gasto total de gas, esta dado por:

$$q_{Tg} = q_g + (GE_o)q_o \quad (\text{Ec. 2.89})$$

El efecto de la presencia de condensados mediante el empleo de estas ecuaciones sólo proporciona resultados aproximados. La solución rigurosa implicaría el uso de ecuaciones de estado para determinar la cantidad de condensado en la corriente de gas, a diferentes presiones y temperaturas. Además se tendría que usar un método de flujo multifásico en el cálculo de las caídas de presión.

Erosión de tuberías.

Considerando hipotéticamente dos pozos de alta capacidad de producción, uno de gas y el otro de aceite; de yacimientos de gas seco y de aceite respectivamente, produciendo sin restricción alguna al flujo y cerrados después de un mismo tiempo de producción para efectuarles cambio de tubería, se observará que existe en la tubería del pozo de gas, y a diferencia de la del pozo de aceite, un daño muy severo. Esto se debe al alto poder de erosión del gas que se acentúa más a altas velocidades. En la otra tubería, el efecto de la erosión es

casi nulo, pero puede verse incrementado al aumentar la relación gas - líquido.

La velocidad a la que se inicia la erosión no se ha podido determinar de manera exacta pues la presencia de sólidos en el flujo puede provocarla a bajas velocidades.

Sin embargo, tal velocidad se ha correlacionado con la densidad del fluido y se ha obtenido una expresión con resultados aceptables:

$$V_e = \frac{C_4}{\rho_s^{0.5}} \quad (\text{Ec. 2.90})$$

donde C_4 , es una constante de proporcionalidad y varia entre 75 y 150. De las ecuaciones 2.44 y 2.45, para $T_o = 60$ ($^{\circ}\text{F}$) y $P_o = 14.7$ (lb/pg^2_{abs}), se tiene que:

$$\rho_s = \frac{2.7044 P \gamma_s}{Z(T + 460)} \quad (\text{Ec. 2.91})$$

suponiendo un valor promedio de C_4 , de 100 y sustituyendo la ecuación 2.91 en la ecuación 2.90 se obtiene:

$$V_e = 60.81 \left[\frac{Z(T + 460)}{P \gamma_s} \right]^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.92})$$

para una sección circular de área A (pg^2), se tiene que la ecuación para evaluar el gasto, empleando unidades prácticas, es:

$$q_e = 1291.539 \times 10^6 A \left[\frac{P}{Z(T + 460) \gamma_s} \right]^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.93})$$

donde P , T y Z están a las condiciones del punto donde se desea obtener la velocidad.

Cuando se utilizan inhibidores de corrosión debe tenerse especial cuidado en no rebasar la velocidad de erosión, pues la protección de estos proporcionan al interior de la tubería desaparece al ser arrastrados por la corriente de flujo.

Descarga de líquidos.

Tomando el mismo ejemplo del caso hipotético de dos pozos de alta capacidad de producción, uno de gas y otro de aceite; de yacimientos de gas seco y aceite respectivamente, pero considerando ahora una restricción al flujo con la idea de disminuir la velocidad y con ésta la erosión en las paredes de la tubería, puede caerse en un círculo de incidentes, que de no preverlos, conducirla a la reducción de la producción, e inclusive hasta suspenderla.

Estos incidentes se inician con un incremento en la P_{th} debido a la instalación de un estrangulador más pequeño que el óptimo, provocando que se presente el colgamiento de líquido y que este se acumule en el fondo del pozo, aún en el caso de que sea un pozo que nunca ha producido grandes cantidades de líquido. Debido a esta acumulación de líquidos se incrementa la carga contra la P_{wf} , reduciendo el gasto y por consecuencia la velocidad, iniciándose así, un nuevo ciclo.

Turner, presentó en 1969, un método para determinar la velocidad mínima que debe adquirir la corriente de gas para mantener un arrastre continuo de estas partículas de líquido del pozo. Esta velocidad es en función tanto de la forma y diámetro de las partículas como de la densidad y viscosidad del fluido que la desplaza así como la tensión interfacial entre ambos fluidos. La expresión general para calcular la velocidad terminal de la partícula V_t (pies/seg) es:

$$V_t = \frac{2.04 [\sigma (\rho_L - \rho_g)]^{0.25}}{\rho_g^{0.5}} \quad (\text{Ec. 2.94})$$

suponiendo $\gamma_g = 0.6$, $T = 140$ °F y partículas de líquido de agua o condensados cuyos respectivos valores promedio de tensión interfacial son:

Líquido	σ (dinás/cm)	ρ (lb _m /pie ³)
Agua	60	67
Condensados	20	45

Tabla 2.7-. Valores promedio de tensión interfacial.

Las expresiones para evaluar la velocidad a la cual el gas arrastrará las partículas de líquido son:

$$V_g (\text{agua}) = \frac{5.62(67 - 0.0031 P)^{0.25}}{(0.0031 P)^{0.5}} \quad (\text{Ec. 2.95})$$

$$V_g (\text{condensados}) = \frac{4.02(45 - 0.0031 P)^{0.25}}{(0.0031 P)^{0.5}} \quad (\text{Ec. 2.96})$$

donde la densidad del gas está expresada en términos de P . Este método es aplicable para relaciones mayores de 130 ($\text{bl}/10^6 \text{ pies}_g^3$) y en caso de presentarse agua y condensados, Turner recomienda emplear la ecuación 2.95.

Para pozos donde el método preventivo ya no representa una solución, ya que la carga de fluidos es excesiva sobre la cara de la formación, es indispensable la selección de algún método correctivo eventual o permanente en función de un análisis técnico y económico. Tales métodos incluyen bombeo mecánico, émbolo viajero, bombeo neumático, flujo intermitente con controladores de flujo, instalación de tuberías de menor diámetro o inyección de espumas.

- *Bombeo mecánico.*- Consiste en bombear el fluido por la TP y dejar fluir el gas por la TR; se recomienda en campos cerca de su presión de abandono o de muy baja presión pero alta relación gas - líquido.
- *Émbolo viajero.*- Desaloja los fluidos por la TP a través de un émbolo empujado por la presión acumulada del gas del espacio anular, en el período en el cual el pozo ha estado cerrado, por un controlador de flujo o por un reloj.
- *Bombeo neumático.*- Empleado de manera convencional y junto con un desviador de líquido, levanta el líquido por la TP y el gas por la TR. El desviador abre, cuando sobre él opera una determinada carga de fluidos, permitiendo entrar a los líquidos del espacio anular a la TP y acumularse hasta que la válvula operante actúe para desplazar el bache de líquido a la superficie.

- *Inyección de reactivos.*- Consiste en tratar al pozo con surfactantes o espumas que al reducir la tensión interfacial permite descargar el pozo del bache del líquido. Se recomienda en pozos con problemas de agua.
- *Instalación de tubería de diámetro reducido.*- Con la idea de mantener una producción de gas constante, en algunas ocasiones es necesario introducir dentro de la tubería ya existente, otra de menor diámetro, por ejemplo una tubería de 1 (pg) dentro de una TP de 2 7/8 (pg). Los resultados de este método han demostrado su eficiencia aplicándolo a pozos de gas donde las pérdidas por fricción no son severas.

Flujo de gas a través de estranguladores.

Un estrangulador es una herramienta cuya función es la de restringir el paso de un fluido bajo presión, con el objeto de controlar el gasto del pozo en las cantidades deseadas, como se muestra en la figura, y con esto:

- Ejercer la contrapresión suficiente para evitar la entrada de arena en el pozo o la conificación de agua.
- Conservar la energía del yacimiento, asegurando una declinación más lenta de su presión.
- Protege al equipo superficial y subsuperficial.

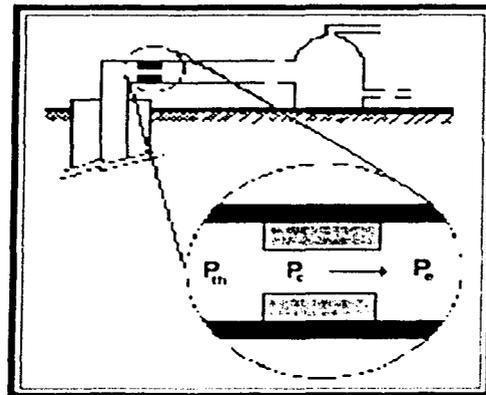


Fig. 2.13-. Presiones consideradas en el flujo a través de estranguladores.

Principios teóricos.

Los principios sobre los cuales se soporta esta teoría son los que se deducen de la ecuación general de balance de energía (Ec. 2.5) que expresa lo siguiente:

“para un fluido de una sola fase, que fluye normalmente entre cualesquiera dos puntos bajo condiciones estacionarias, la suma de energía de expansión ($V\Delta P$), energía potencial ($g/g_c\Delta h$), energía cinética ($1/2V^2/g_c$) y energía irreversible (ΔW_s) deberá ser constante”. Esto se resume en la siguiente expresión:

$$\int_1^2 \left(V dp + \frac{g}{g_c} dh + \frac{1}{2} \frac{dv^2}{g_c} + dW_s \right) = 0 \quad (\text{Ec. 2.97})$$

En el caso de flujo a través de un estrangulador, los límites de integración son: a la entrada (1) y a la parte central (2) como se observa en la siguiente figura.

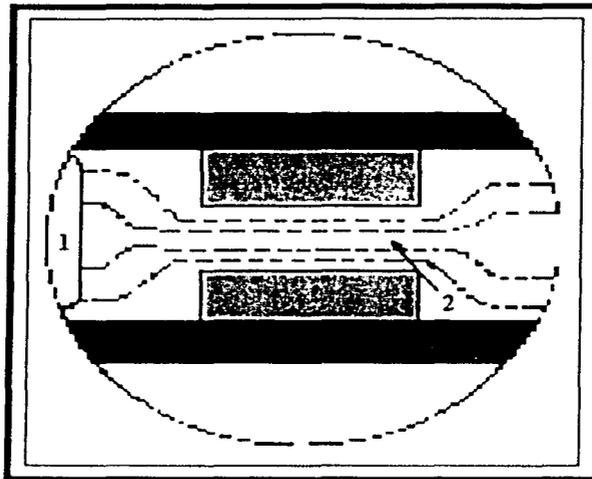


Fig. 2.14-. Límites de integración y líneas de flujo

Como los estranguladores que se instalan en la boca del pozo, para controlar la producción, están basados en el principio de flujo crítico, se pretende, al seleccionar uno de ellos, que la presión después de la restricción no afecte a la presión en la

cabeza del pozo y como consecuencia su comportamiento. Un número de Mach igual o mayor a la unidad asegurará esta pretensión. El número de Mach se define como la relación de la velocidad real del fluido (V_f) entre la velocidad de propagación de la onda acústica del fluido en cuestión (V_p).

$$M = \frac{V_f}{V_p} \quad (\text{Ec. 2.98})$$

En función de este número, se definen tres diferentes regímenes de flujo:

- Para $M < 1$, el flujo es subsónico.
- Para $M > 1$, el flujo es supersónico (o supercrítico).
- Para $M = 1$, el flujo es sónico (o crítico).

Cuando $M=1$, el área de flujo alcanza su valor mínimo y se dice que se ha logrado una condición de garganta a cuyas propiedades se le denomina "críticas" y a las anteriores a ella como relaciones críticas.

El conjunto de ecuaciones que describen las condiciones de flujo isoentrópico estacionario son:

$$\frac{T^*}{T_o} = \frac{2}{k+1} \quad (\text{Ec. 2.99})$$

$$\frac{P^*}{P_o} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{Ec. 2.100})$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_o} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (\text{Ec. 2.101})$$

donde: $k = \frac{C_p}{C_v} \quad (\text{Ec. 2.102})$

Si se considera flujo sónico y un gas diatómico ($k = 1.4$) se tendría que tomar en cuenta la siguiente tabla.

k	1.2	1.3	1.4	1.67
$\frac{P^*}{P_o}$	0.5644	0.5467	0.5283	0.4867
$\frac{T^*}{T_o}$	0.9091	0.8696	0.8333	0.7491
$\frac{\rho^*}{\rho_o}$	0.6209	0.6276	0.6340	0.6497

Tabla 2.8-. Relación de Presión, Temperatura y Densidad crítica para flujo isoentrópico de un gas ideal.

El valor de k puede obtenerse de la siguiente figura o bien de la siguiente ecuación:

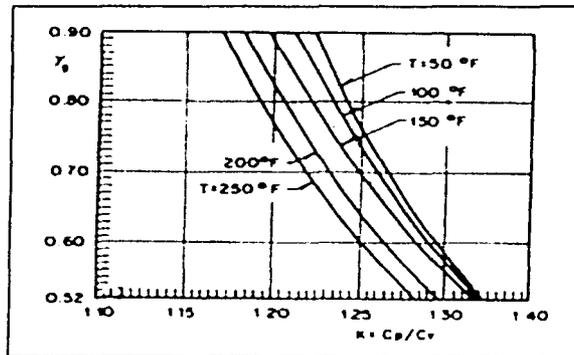


Fig. 2.15-. Relación de calores específicos en función de la temperatura y densidad relativa.

$$k = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 + b_5x^5 + b_6x^6 + b_7x^8 + b_9x^9 \quad (\text{Ec. 2.103})$$

$$x = 10 * \gamma_0 - 7.1 \quad (\text{Ec. 2.104})$$

$$b_0 = 1.245874 - 0.027331 Y - 0.017771 Y^2 + 0.00305 Y^3 + 0.013167 Y^4 \quad (\text{Ec. 2.105})$$

$$b_1 = -0.027336 + 0.001484 Y - 0.015829 Y^2 - 0.0033 Y^3 + 0.015654 Y^4 \quad (\text{Ec. 2.106})$$

$$b_2 = 0.002485 - 0.008877 Y + 0.020643 Y^2 + 0.009488 Y^3 - 0.021162 Y^4 \quad (\text{Ec. 2.107})$$

$$b_3 = 0.002334 - 0.007175 Y + 0.025258 Y^2 + 0.009191 Y^3 - 0.024669 Y^4 \quad (\text{Ec. 2.108})$$

$$b_4 = 0.000717 + 0.006973 Y - 0.017431 Y^2 - 0.007491 Y^3 + 0.017444 Y^4 \quad (\text{Ec. 2.109})$$

$$b_5 = 0.002823 - 0.004985 Y^2 - 0.004656 Y^3 + 0.06673 Y^4 \quad (\text{Ec. 2.110})$$

$$b_6 = -0.001784 Y + 0.003282 Y^2 + 0.002643 Y^3 - 0.004141 Y^4 \quad (\text{Ec. 2.111})$$

$$b_7 = 0.000029 - 0.000056 Y - 0.000191 Y^2 + 0.000223 Y^3 \quad (\text{Ec. 2.112})$$

$$b_8 = 0.000041 + 0.00008 Y + 0.000275 Y^2 - 0.000321 Y^3 \quad (\text{Ec. 2.113})$$

$$b_9 = 0.000028 + 0.000056 Y \quad (\text{Ec. 2.114})$$

$$Y = 0.01 T - 1.5 \quad (\text{Ec. 2.115})$$

Desarrollo del fenómeno.

Considérese un estrangulador como el de la figura 2.16, el cual esta en conexión con la cabeza del pozo que provee la presión P_{th} .

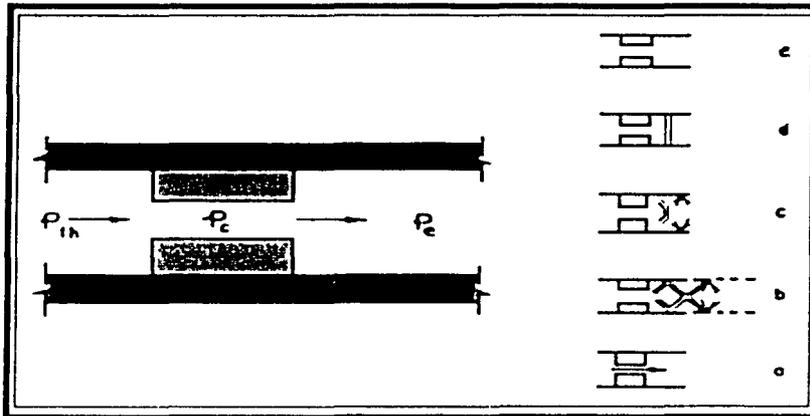


Fig. 2.16-. Efecto de P_c sobre el flujo de un estrangulador.

La descarga ocurre en la tubería de escurrimiento, en la cual la presión se denota como P_e y se denomina presión corriente abajo del estrangulador. Se supone que la P_{th} es

suficientemente alta para producir condiciones de flujo sónico en la garganta y flujo supersónico corriente abajo.

Mientras P_e permanezca igual o menor que la correspondiente al área de salida, P_c , no se presenta ningún efecto sobre el flujo dentro del estrangulador, ejemplo **a** de la figura 2.16. A medida que la P_e aumenta por encima de la P_c , progresivamente se forma ondas de choque oblicuas, más fuertes, corriente abajo como aparece en los ejemplos **b** y **c** de la figura 2.16. El flujo en el estrangulador aún no se ve afectado el ejemplo **d** de la figura ilustra la situación en la cual la P_e es lo suficientemente alta para producir una onda de choque normal en la salida; incrementos adicionales en la presión corriente abajo hacen que el choque normal se desplace hacia atrás, dentro del estrangulador. Corriente abajo del choque, flujo es ya subsónico, de modo que la velocidad y el gasto másico disminuyen y la presión aumenta como se muestra en el ejemplo **e** de la figura 2.16.

Eventualmente un aumento posterior de P_e hace que en todo el estrangulador el flujo sea subsónico y que el gasto másico disminuya progresivamente.

Diámetro de estrangulador.

Combinando una ecuación de estado con la ecuación de Bernoulli y considerando flujo adiabático sin fricción, se obtiene una expresión general para calcular el diámetro del estrangulador en $64v_{os}$ de (pg), y puede aplicarse para flujo crítico y subcrítico. Tal expresión es:

$$q_s = \frac{C_d P_{th} d_e^2}{(\gamma_s (\bar{T} + 460) Z)^{0.5}} \left[\left(\frac{k}{k-1} \right) H \right]^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.116})$$

$$\text{donde: } H = \left(\frac{P_e}{P_{th}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_e}{P_{th}} \right)^{\frac{(k+1)}{k}} \quad (\text{Ec. 2.117})$$

para $P_0 = 14.7$ (lb/pg²) y $T_0 = 60$ (°F), el coeficiente de descarga, $C_d = 1.9083 \cdot 10^{-4}$ y el resto de las variables se emplean en unidades prácticas. El valor de P_e es, en este caso, el correspondiente a la presión corriente abajo del

estrangulador. Cook y Dotterweich por su parte, plantearon la siguiente ecuación para calcular el diámetro del estrangulador:

$$q_g = 155500 C_d A P_1 \left[\frac{64.34 kH}{\gamma_g (\bar{T} + 460)(k-1)} \right]^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.118})$$

donde: A = área el estrangulador en (pg^2)
para $2/64v_{os} < d_\phi \leq 32/64v_{os}$

el coeficiente de descarga se obtiene de la siguiente expresión:

$$C_d = 0.548924 + 3.72040110^{-2} d_\phi - 1.603191 \times 10^{-3} d_\phi^2 + 2.387117 \times 10^{-5} d_\phi^3 - 4.942371 \times 10^{-8} d_\phi^4 \quad (\text{Ec. 2.119})$$

para los valores de d_ϕ superiores a $32/64v_{os}$ el coeficiente de descarga es constante e igual a 0.828; finalmente el diámetro del estrangulador en $64v_{os}$ de pulgada, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$d_\phi = 64 \left(\frac{4C_d A}{\pi} \right)^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.120})$$

Ejemplo: Obtener el diámetro del estrangulador dadas las siguientes condiciones:

$$q_g = 1340927 \text{ (pies}_g^3/\text{día)}$$

$$\gamma_g = 0.69$$

$$k = 1.25 \text{ (medido)}$$

$$T = 140 \text{ (}^\circ\text{F)}$$

$$P_{th} = 514.3 \text{ (lb/pg}_{abs}^2)$$

$$P_e = 411.5 \text{ (lb/pg}_{abs}^2)$$

Solución:

$$\frac{P^*}{P_o} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0.555$$

$$\frac{P_e}{P_o} = 0.8$$

como $0.8 > 0.555$, se tiene flujo subcrítico. El diámetro de estrangulador para obtener flujo crítico se calcula de la siguiente forma:

$$H = \left(\frac{P_e}{P_{th}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_e}{P_{th}} \right)^{\frac{(k+1)}{k}} = 0.0305$$

se despeja d_ϕ^2 de la ecuación

$$q_s = \frac{C_d P_{th} d_\phi^2}{(\gamma_s (\bar{T} + 460) Z)^{0.5}} \left[\left(\frac{k}{k-1} \right) H \right]^{0.5}$$

por lo que: $d_\phi^2 = 25/64_{vos} (pg)$

de la ecuación de Cook y Dotterweich se tiene despejando $C_d * A$:

$$q_s = 155500 C_d A P_1 \left[\frac{64 .34 kH}{\gamma_s (\bar{T} + 460) (k-1)} \right]^{0.5} = 0.1089138$$

por lo que:

$$d_\phi = 64 \left(\frac{4 C_d A}{\pi} \right)^{0.5} = \frac{24}{64_{vos}} (pg)$$

Algunas compañías realizan ajustes de la siguiente ecuación para evaluar el comportamiento de sus estranguladores:

$$q_s = \frac{C_d P_{th} d_\phi^2}{(\gamma_s (\bar{T} + 460) Z)^{0.5}} \left[\left(\frac{k}{k-1} \right) H \right]^{0.5}$$

así mismo la siguiente ecuación se emplea para estranguladores de 6 pg bajo condiciones de flujo crítico.

$$q_s = \frac{99.188 d_\phi^2 P_1}{((T + 460) \gamma_s)^{0.5}} \quad (\text{Ec. 2.121})$$

sustituyendo los datos del ejemplo en la expresión anterior tendremos como resultado del diámetro (d_ϕ):

$$d_\phi^2 = \frac{q_s ((T + 460) \gamma_s)^{0.5}}{99.188 P_1} = 534.847 (pg^2)$$

$$d_\phi = \frac{23.1}{64} = \frac{24}{64} (pg)$$

Flujo multifásico en tubería.

Patrones de flujo.

Es evidente que al fluir dos fases simultáneamente, lo pueden hacer en formas diversas. Cada una de estas formas representa una distribución relativa de una fase con respecto a la otra, constituyendo un patrón o tipo de flujo. En la siguiente figura se muestran los diferentes patrones de flujo observados en tuberías horizontales, por Beggs en sus trabajos experimentales.

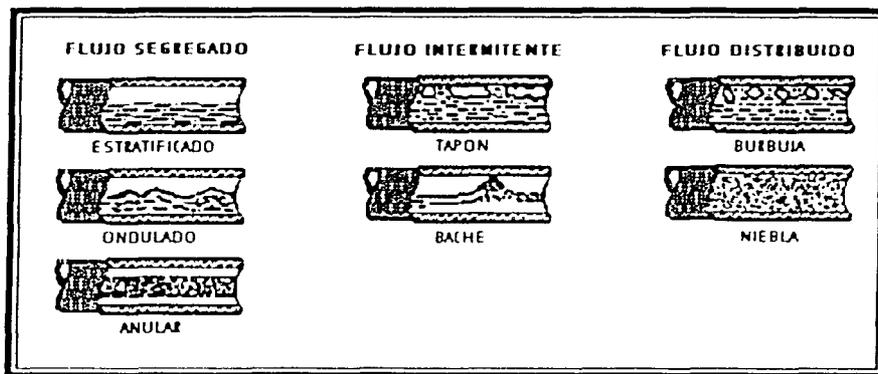


Fig. 2.17-. Patrones en flujo horizontal, observados por Beggs.

Colgamiento (Y_L).

Se define como la relación entre el volumen de líquido existente en una sección de tubería a las condiciones de flujo, y el volumen de la sección aludida. Esta relación de volúmenes depende de la cantidad de líquido y gas que fluyen simultáneamente en la tubería. Generalmente, la velocidad con que fluye el gas es diferente de la velocidad con que fluye el líquido, proporcionando un "resbalamiento" entre las fases.

El término "resbalamiento" se usa para describir el fenómeno natural del flujo a mayor velocidad de una de las dos fases. Las causas de este fenómeno son diversas. La resistencia al flujo por fricción es mucho menor en la de la fase gaseosa que

en la fase líquida. La diferencia de compresibilidades entre el gas y el líquido, hace que el gas en expansión viaje a mayor velocidad que el líquido. Cuando el flujo es ascendente o descendente, actúa la segregación gravitacional ocasionando que el líquido viaje a menor velocidad que el gas, para el primer caso, y a mayor velocidad para el segundo caso.

Para calcular las pérdidas de presión por elevación (carga hidrostática), es necesario predecir con precisión el colgamiento considerando el resbalamiento entre las fases.

Las expresiones establecidas por Mukherjee y Brill son:

$$Y_L = \exp \left[\left(C_1 + C_2 \sin \theta + C_3 \sin^2 \theta + C_4 N_{L\mu}^2 \right) \frac{N_{gv}^{C_5}}{N_{Lv}^{C_6}} \right] \quad (\text{Ec. 2.122})$$

donde: $N_{L\mu}^2 = 0.15726 \mu_L \left(\frac{1}{\rho_L \sigma^3} \right)^{0.25}$ (Ec. 2.123)

$$N_{Lv} = 1.938 V_{iL} \left(\frac{\rho_L}{\sigma} \right)^{0.25} \quad (\text{Ec. 2.124})$$

$$N_{gv} = 1.938 V_{ig} \left(\frac{\rho_L}{\sigma} \right)^{0.25} \quad (\text{Ec. 2.125})$$

si: $N_{Lv} \leq 10^{(0.321 - 0.017(N_{gv}) - 4.267(\sin \theta) - 2.9728 N_{L\mu}) - 0.0338(\log^2(N_{gv})) - 3.925(\sin^2 \theta)}$ el flujo es ascendente estratificado.

Dirección del flujo	Tipo de flujo	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
Horizontal o ascendente	Todos	-0.36011	0.12988	-0.011979	2.34323	0.47569	0.28866
Descendente	Estratificado	1.33028	4.80614	4.17158	56.26227	0.07995	0.50489
	Otros	-0.51664	0.78481	0.55163	15.51921	0.37177	0.39395

Tabla 2.9.- Coeficientes de la ecuación de Mukherjee y Brill, para diferentes patrones de flujo.

Otro concepto que se usa con frecuencia en los cálculos de gradientes para flujos multifásico, es el colgamiento sin resbalamiento (λ). Se define en la misma forma que Y_L pero se calcula a partir de las condiciones de P y T de flujo existentes considerando las producciones obtenidas en la superficie (q_o y R), esto es:

$$\lambda = \frac{q'_{L}}{q'_{L} + q'_{s}} = \frac{1}{\frac{q_o (R - R_s) B_s}{5.615 (q_o B_o + q_w B_w)}} \quad (\text{Ec. 2.126})$$

donde q' es el gasto a condiciones de escurrimiento.

Velocidades superficiales.

Es la velocidad que tendría cualquiera de las fases si ocupara toda la tubería. Se define con las siguientes ecuaciones:

$$V_{sl} = \frac{q'_{L}}{A_p} = \frac{0.01191 (q_o B_o + q_w B_w)}{d^2} \quad (\text{Ec. 2.127})$$

$$V_{sg} = \frac{q'_{s}}{A_p} = \frac{0.002122 q_o (R - R_s) B_s}{d^2} \quad (\text{Ec. 2.128})$$

$$V_m = \frac{q'_{L} + q'_{s}}{A_p} = V_{sl} + V_{sg} \quad (\text{Ec. 2.129})$$

donde A_p es el área de la sección transversal de la tubería. De estas ecuaciones se observa que:

$$\lambda = \frac{V_{sl}}{V_m} \quad (\text{Ec. 2.130})$$

Cuando se produce por el espacio anular, el área transversal al flujo es:

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{ci}^2 - d_{cr}^2) \quad (\text{Ec. 2.131})$$

por lo que las ecuaciones de V_{sl} y V_{sg} quedan de la siguiente forma:

$$V_{sl} = \frac{0.01191 (q_o B_o + q_w B_w)}{(d_{ci}^2 - d_{re}^2)} \quad (\text{Ec. 2.132})$$

$$V_{rs} = \frac{0.002122 q_o (R - R_s) B_r}{(d_{ci}^2 - d_{re}^2)} \quad (\text{Ec. 2.133})$$

Velocidad real.

Aplicando el concepto de colgamiento, se puede obtener la velocidad real correspondiente a cada fase:

$$V_L = \frac{q'_L}{A_L} = \frac{q'_L}{A_p Y_L} = \frac{V_{sl}}{y_L} \quad (\text{Ec. 2.134})$$

$$V_g = \frac{q'_g}{A_g} = \frac{q'_g}{A_p (1 - Y_L)} = \frac{V_{rs}}{(1 - Y_L)} \quad (\text{Ec. 2.135})$$

Densidad de la mezcla de los fluidos.

La densidad de la mezcla de los fluidos se obtiene a partir del colgamiento con:

$$\rho_m = \rho_L Y_L + \rho_g (1 - Y_L) \quad (\text{Ec. 2.136})$$

Algunos autores calculan la densidad de la mezcla sin considerar el resbalamiento entre las fases, esto es:

$$\rho_{ms} = \rho_L \lambda + \rho_g (1 - \lambda_L) \quad (\text{Ec. 2.137})$$

También puede obtenerse esta densidad a partir de la expresión siguiente:

$$\rho_m = \frac{M}{V_m} \quad (\text{Ec. 2.138})$$

donde:

M es la masa de la mezcla @cs por barril de aceite producido @cs (lb_m/bl_o)

V_m es el volumen de la mezcla @cs por barril de aceite producido @cs (pies³/bl_o)

Los valores de M y V_m se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$M = M_o + M_g + M_w \quad (\text{Ec. 2.139})$$

$$M_o = \gamma_o \left(\frac{lb_o / pie_o^3}{lb_w / pie_w^3} \right) 62.428 \left(\frac{lb_w}{pie_w^3} \right) 5.615 \left(\frac{pie_o^3}{bl_o} \right) = 350.5\gamma_o \quad (\text{Ec. 2.140})$$

$$M_g = \gamma_g \left(\frac{lb_g / pie_g^3}{lb_a / pie_a^3} \right) 0.0764 \left(\frac{lb_a}{pie_a^3} \right) R \left(\frac{pie_g^3 @ cs}{bl_o @ cs} \right) = 0.0764 \gamma_g R \quad (\text{Ec. 2.141})$$

$$M_w = \gamma_w \left(\frac{lb_w / pie_w^3}{lb_w / pie_w^3} \right) 62.428 \left(\frac{lb_w}{pie_w^3} \right) 5.615 \left(\frac{pie_w^3}{bl_w} \right) WOR \left(\frac{bl_w}{bl_o} \right) = 350.5\gamma_w WOR \quad (\text{Ec. 2.142})$$

sustituyendo y reduciendo términos la expresión queda:

$$M = 350.5(\gamma_o + \gamma_w WOR) + 0.0764 R \gamma_g \quad (\text{Ec. 2.143})$$

para el cálculo de V_m tenemos
$$V_m = \left(\frac{pies_{o+g+w}^3 @ cs}{bl_o @ cs} \right)$$

$$V_{mo} = 5.615 B_o \quad (\text{Ec. 2.144})$$

$$V_{mg} = (R - R_s) \left(\frac{pies_g^3 @ cs}{bl_o @ cs} \right) B_w \left(\frac{pies_g^3 @ ce}{pies_g^3 @ cs} \right) \quad (\text{Ec. 2.145})$$

$$V_{mw} = WOR \left(\frac{bl_w}{bl_o} \right) 5.615 \left(\frac{pies_w^3}{bl_w} \right) B_w \left(\frac{pies_w^3 @ ce}{pies_w^3 @ cs} \right) \quad (\text{Ec. 2.146})$$

por lo que la ecuación queda

$$V_m = 5.615(B_o + B_w WOR) + (R - R_s) B_g \quad (\text{Ec. 2.147})$$

Si sustituimos y reducimos términos de la ecuación 2.147 y 2.143 en la ecuación 2.138, la densidad de la mezcla de los fluidos queda:

$$\rho_m = \frac{M}{V_m} = \frac{350.5(\gamma_o + \gamma_w WOR) + 0.0764 R \gamma_g}{5.615(B_o + B_w WOR) + (R - R_s)B_g} \quad (\text{Ec. 2.148})$$

Gasto de masa.

Se define por la siguiente expresión:

$$W_m = \frac{\text{lb}_m \text{ de líquido y gas}}{\text{segundo}} \quad (\text{Ec. 2.149})$$

Se puede obtener este gasto con cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$W_m = \frac{q_o M}{86400} \quad (\text{Ec. 2.150})$$

$$W_m = W_o + W_w + W_g \quad (\text{Ec. 2.151})$$

$$W_o = \frac{\rho_o q_o B_o}{15388} \quad (\text{Ec. 2.152})$$

$$W_w = \frac{\rho_w q_w B_w}{15388} \quad (\text{Ec. 2.153})$$

$$W_g = \frac{\rho_g q_g (R - R_s) B_g}{86400} \quad (\text{Ec. 2.154})$$

Viscosidad de la mezcla.

Dependiendo del método que se aplique, se usan las siguientes ecuaciones para obtener la viscosidad de la mezcla de fluidos:

$$\mu_m = \mu_L \lambda + \mu_g (1 - \lambda) \quad (\text{Ec. 2.155})$$

$$\mu_m = \mu_L^{\gamma_L} \mu_g^{(1-\gamma_L)} \quad (\text{Ec. 2.156})$$

$$\mu_L = \mu_o f_o + \mu_w f_w \quad (\text{Ec. 2.157})$$

Viscosidad de una emulsión.

Si la mezcla es una emulsión de tipo salmuera en aceite, su viscosidad se puede estimar basándose en las observaciones realizadas por Woelflin como se muestra en la figura. La mayoría de las emulsiones encontradas en la producción de aceite y agua son de este tipo. Dependiendo de los glóbulos de la fase emulsionada, las emulsiones pueden ser estables o compactas, intermedias o suaves. El primer caso se puede presentar en mezclas de aceite y agua fluyendo con altas relaciones gas - aceite, bajo condiciones extremas de agitación. El tercer caso se puede presentar cuando las condiciones de agitación son mínimas, como algunos pozos con sistemas de bombeo mecánico.

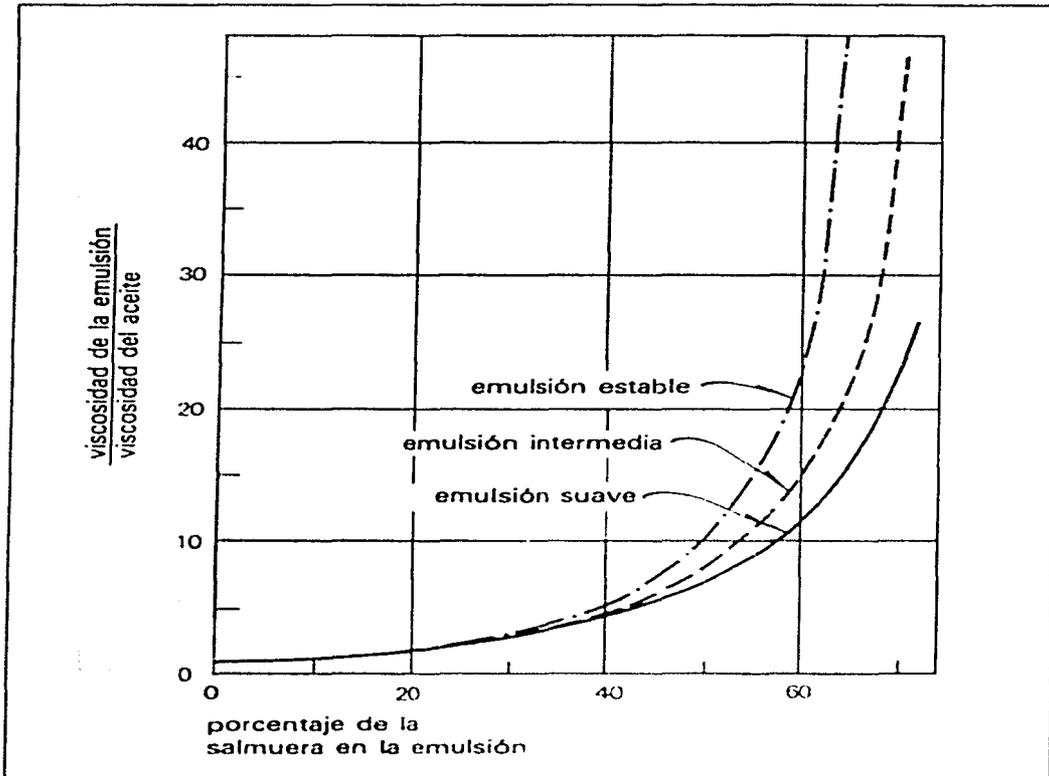


Fig. 2.19 Variación de la razón viscosidad de una emulsión / viscosidad del aceite, con el contenido de salmuera en la mezcla.

Tensión superficial de la mezcla de líquidos.

Esta tensión se calcula con la siguiente ecuación:

$$\sigma_L = \sigma_o f_o + \sigma_w f_w \quad (\text{Ec. 2.161})$$

Densidad de la mezcla de líquidos.

La densidad se calcula con la siguiente expresión:

$$\rho_L = \rho_o f_o + \rho_w f_w \quad (\text{Ec. 2.162})$$

Flujo multifásico en tubería horizontal.**Aspectos generales.**

La comprensión de los mecanismos y características del flujo de dos o más fases, en una sección del sistema de producción, tiene como finalidad optimizar el diseño de la sección en particular y del sistema en general, para obtener la máxima producción con las menores pérdidas de energía.

La capacidad de flujo en un sistema integral de producción, está en función de parámetros tales como: la longitud y diámetros de tubería, grado de inclinación, regímenes de flujo, propiedades de los fluidos, condiciones de presión y temperatura, etc., con los que se determinan las pérdidas de presión de las mezclas de los fluidos desde el radio de drenaje de pozo hasta la batería de separación.

Numerosos autores han presentado métodos experimentales de cálculo, conocidos también como correlaciones para evaluar el gradiente de presión en tuberías horizontales. Aquí aparecen cuatro de éstas, de las cuales se analizarán las de Beggs y Brill y Dukler.

- Correlación de Bertuzzi, Tek y Poettmann.
- Correlación de Eaton, Andrews y Knowles.
- Correlación de Beggs y Brill.
- Correlación de Dukler.

Para flujo horizontal el gradiente de presión debido al cambio de elevación es igual a cero por lo que la ecuación 2.8 se reduce a:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_T = \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{ac} + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_f \quad (\text{Ec. 2.163})$$

por lo que:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_T = f \frac{\rho v^2}{2 g_c d} + \frac{\rho \Delta (v^2)}{2 g_c \Delta L} \quad (\text{Ec. 2.164})$$

La mayoría de los investigadores han adoptado la ecuación anterior para evaluar las características del flujo en dos fases y posteriormente determinar el gradiente de presión total. El problema de la variación de las características de flujo se elimina al suponer que la mezcla gas - líquido es homogénea en un intervalo pequeño de la tubería por lo que la ecuación ahora queda:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_T = f_{\eta} \frac{\rho_m v_m^2}{2 g_c d} + \frac{\rho_m \Delta (v_m^2)}{2 g_c \Delta L} \quad (\text{Ec. 2.165})$$

En donde f_{η} , ρ_m y v_m se refieren a la mezcla y son definidos en forma distinta por los autores de las distintas correlaciones.

El factor de fricción, como se indicó, depende del número de Reynolds; esto es, de las fuerzas viscosas y de inercia de la mezcla de fluidos y de la rugosidad de la tubería. En flujo de dos o más fases, el factor de fricción se denotará como f_{η} y depende, además de las fuerzas anteriores, de las gravitacionales y las interfaciales.

Aunque se ha intentado correlacionar el factor de fricción en grupos adimensionales que comprendan estas fuerzas, no se ha tenido éxito completo.

El enfoque que más se ha seguido, es determinar el factor de fricción a partir de datos experimentales y tratar de correlacionarlo con alguna forma de número de Reynolds para dos fases.

Cálculo de la caída de presión en tubería horizontal.

En el flujo de fluidos a través de tubería, existen tres problemas que resolver, como se observa en la siguiente figura:

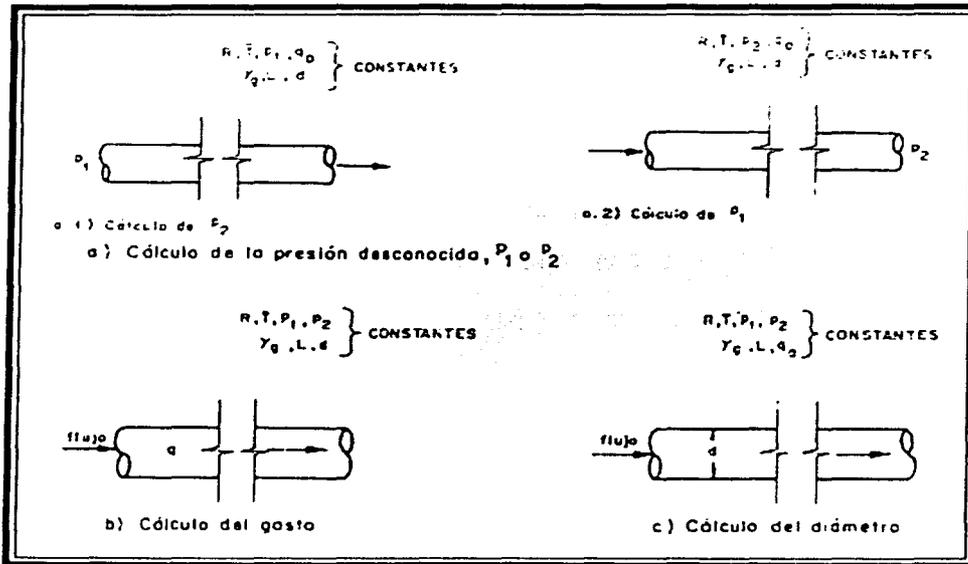
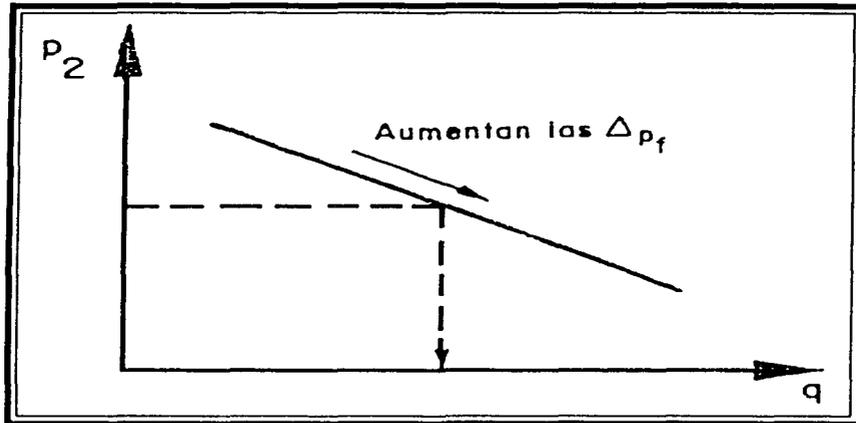


Fig. 2.20-. Esquema de los tres problemas en la práctica para flujo en tuberías.

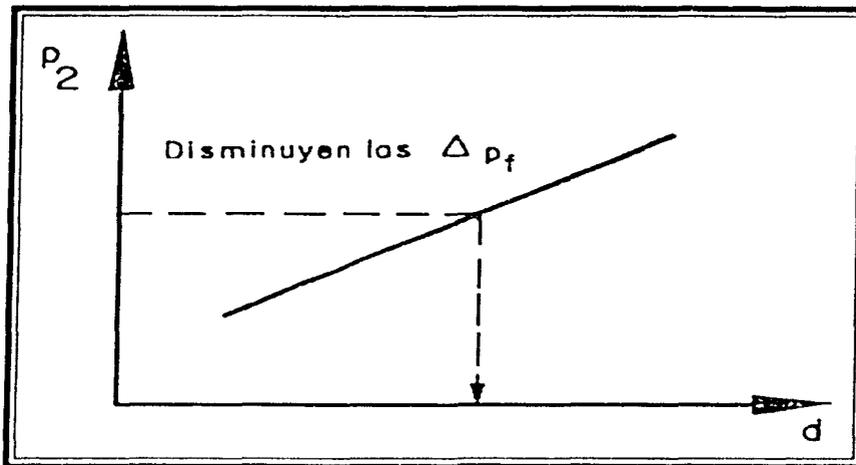
Si se cuenta con un programa de cómputo para resolver el primer caso, este programa podrá aplicarse en el cálculo del gasto en la siguiente forma, en la que se considera como presión desconocida la de descarga P_2 .

- Suponer un gasto y calcular P_2 .
- Repetir el procedimiento para otros supuestos. A mayor gasto menor P_2 .
- Graficar q vs. P_2 .
- Obtener de la gráfica el gasto correspondiente a la presión de descarga deseada.

Fig. 2.21-. Gráfica de q vs. P_2

Para calcular el diámetro se puede proceder de la siguiente manera:

- Suponer un diámetro de tubería y obtener P_2 .
- Repetir el procedimiento para diferentes diámetros. A mayor diámetro mayor P_2 .
- Graficar d vs. P_2 .
- De esta gráfica, obtener el diámetro correspondiente de la presión de descarga deseada.

Fig. 2.22-. Gráfica de d vs. P_2

En el caso de que el dato buscado sea P_1 , el comportamiento de las gráficas será invertido; es decir, a mayor gasto, mayor P_1 y a mayor diámetro, menor P_1 .

Generalmente se considera flujo isotérmico, para el cual las propiedades de los fluidos dependen exclusivamente de la presión. En este caso, la predicción de la caída de presión consiste en suponer una caída de presión (ΔP) y aplicar la ecuación 2.165. Para determinar el incremento de la longitud (ΔL) correspondiente a la ΔP supuesta, repitiéndose el procedimiento hasta alcanzar la longitud total. Naturalmente que la exactitud de los cálculos aumenta al reducir el incremento de presión supuesto; pero también aumenta la cantidad de trabajo requerida para el cálculo.

Por esta razón se debe establecer el compromiso entre estos dos aspectos, teniendo en mente que el incremento de presión debe ser pequeño a presiones bajas, en las que la velocidad varía con mayor rapidez junto con la presión, no así a presiones altas en las que la variación es menor. Una regla establecida es usar incrementos de presión menores que el 10% del valor de la presión media.

Cuando no se considera flujo isotérmico, el cálculo del gradiente de presión implica un proceso iterativo, ya que la temperatura es una función de la distancia. Entonces, además de suponer una ΔP , se tiene que suponer una ΔL , y de ahí determinar la temperatura media de flujo.

Procedimiento general de cálculo.

El procedimiento de cálculo para el caso de flujo isotérmico, es el siguiente:

1. Se inicia con una presión P_1 conocida a la entrada de la tubería. En este punto $L = 0$.
2. Suponer una caída de presión ΔP y calcular \bar{P} y P_2 de la siguiente forma:

$$\bar{P} = P_1 - \frac{\Delta P}{2} \qquad P_2 = P_1 - \Delta P$$

3. Determinar las propiedades de los fluidos ($R_s, B_o, Z, B_g, \sigma, \mu_o, \mu_g, \rho_o, \rho_g$) a las condiciones medias de escurrimiento. Si la μ_{om} se tiene como dato de campo, ésta deberá ser tomada en lugar del valor obtenido con la correlación de Beal.

$$\mu_{om} = 10^X - 1$$

$$X = Y(T)^{-1.163}$$

$$Y = 10^Z$$

$$Z = 3.0324 - 0.02023 \text{ } ^\circ\text{API}$$

4. Calcular las velocidades superficiales y los gatos máxicos de las fases, así como el colgamiento sin resbalamiento.
5. Determinar el colgamiento Y_L (0) y la densidad de la mezcla.
6. Si las pérdidas por aceleración no se consideran despreciables, determinar su valor.
7. Obtener el valor del factor de fricción de dos fases.
8. Aplicando la ecuación correspondiente determinar el valor del gradiente de presión $\Delta P/\Delta L$ y con éste, el ΔL correspondiente a la ΔP supuesta.
9. Reemplazar L por $L + \Delta L$; si este valor es menor que la longitud total, hacer $P_1 = P_2$ y repetir desde el paso 2. Si L es igual o menor que la longitud total, el cálculo se termina, obteniéndose el valor de la presión final por interpolación si es necesario.

Los pasos 5, 6 y 7 dependen del método que se esté empleando para el cálculo del perfil de presión. Cuando el flujo no es isotérmico, se tienen que incluir los siguientes pasos:

2' Suponer un incremento de longitud ΔL correspondiente a la ΔP supuesta y obtener la temperatura media en el incremento.

8' Si el ΔL calculado es igual al supuesto o está dentro de la tolerancia, continuar en el paso 9.

En caso contrario hacer $\Delta L_s = \Delta L_c$, determinar la temperatura media en el intervalo y regresar al paso 3.

Cálculo del colgamiento de líquido en tubería horizontal transportadora de gas húmedo.

K. Minami y J. P. Brill publicaron en 1967 los resultados de un estudio experimental para determinar el colgamiento de líquido en tuberías horizontales. La figura 2.23, muestra el circuito de prueba, en el cual se efectuaron 119 mediciones para tres diferentes tipos de mezclas. De sus observaciones concluyeron que el fenómeno de colgamiento no quedaba definido totalmente con las correcciones existentes a la fecha, por lo que, de un análisis comparativo entre éstas y los resultados de sus experimentos obtuvieron dos correlaciones: la primera, aplicable a líneas transportadoras de gas húmedo únicamente y la segunda, de carácter general, para cualquier tipo de gas que circule por una línea horizontal.

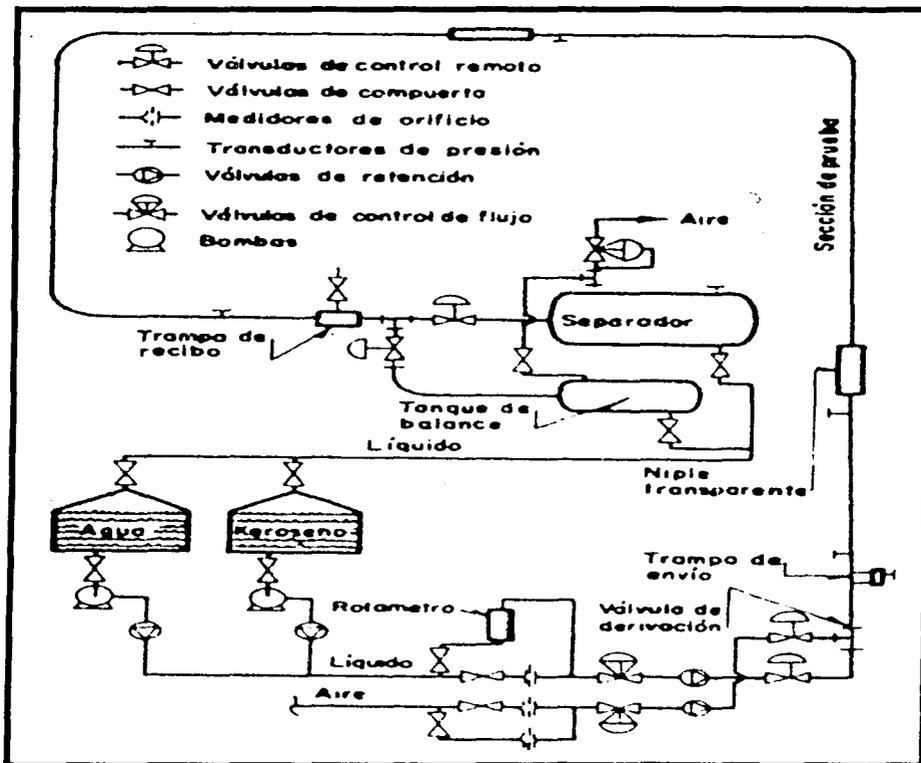


Fig. 2.23-. Circuito de prueba (Minami y Brill)

Transporte de gas húmedo ($0 \leq Y_L(o) \leq 0.35$)

La siguiente expresión se propone para obtener el colgamiento:

$$Y_L(0) = -0.0095 + 3.698x - 11.497x^2 + 65.22x^4 \quad (\text{Ec. 2.166})$$

$$x = \frac{\lambda^{0.8945} N_{pd}^{0.0796}}{N_{Lv}^{0.4076}} \quad (\text{Ec. 2.167})$$

$$N_{pd} = 10.0727 d \left(\frac{\rho_L}{\sigma_L} \right)^{0.25} \quad (\text{Ec. 2.168})$$

El grupo adimensional definido en la ecuación 2.167, resultó independiente del número de la viscosidad del líquido $N_{L\mu}$. El rango de aplicación para x esta entre 0.0026 y 0.15.

$Y_L(0)$ = Colgamiento del líquido en tubería horizontal.

λ = Colgamiento del líquido sin resbalamiento.

N_{pd} = Número de influencia del diámetro de la tubería.

N_{Lv} = Número de la velocidad del líquido.

$N_{L\mu}$ = Número de la viscosidad del líquido.

Correlación general ($0 < Y_L(o) < 1$).

Este método es el resultado de la combinación de los datos de colgamiento en tubería horizontal del artículo de Beggs y los obtenidos por Minami y Brill.

$$Y_L(0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\ln x + 9.21}{8.7115} \right)^{4.3374} \right] \quad (\text{Ec. 2.169})$$

$$\text{donde: } x = \frac{1.84 N_{Lv}^{0.575}}{N_{gv} N_{pd}^{0.0277}} \left(\frac{P}{P_b} \right)^{0.05} \quad (\text{Ec. 2.170})$$

El rango de valores cubiertos en los números adimensionales, de acuerdo con la combinación de datos empleados, es:

0.032	<	N_{Lv}	<	15.86
1.850	<	N_{gv}	<	152.32
9.150	<	N_{pd}	<	42.57
0.0014	<	$N_{L\mu}$	<	0.0096

Correlación de Beggs y Brill.

Esta correlación se desarrolló a partir de datos experimentales en tuberías de acrílico transparente de 1 y 1½ (pg) de diámetro de 90 (pies) de longitud y con inclinaciones de ± 90° bajo condiciones de operación controladas y empleando como fluidos de prueba aire y agua. En la figura 2.18 se presenta un diagrama de las instalaciones empleadas por los autores en la Universidad de Tulsa. A partir del balance de energía, se obtuvo la siguiente ecuación para determinar el gradiente de presión en las tuberías horizontales.

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 43.539 \frac{f_p w_m^2}{\rho_{ns} d^5} + \frac{7.2557 \rho_m w_g w_m}{\rho_{ns} P d^4 \rho_g} \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (\text{Ec. 2.171})$$

Definiendo el término de pérdidas por aceleración:

$$E_k = \frac{7.2557 \rho_m w_g w_m}{\rho_{ns} P d^4 \rho_g} \quad (\text{Ec. 2.172})$$

Por lo que la ecuación 2.171 queda:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{43.539 f_p w_m^2}{\rho_{ns} d^5 (1 - E_k)} \quad (\text{Ec. 2.173})$$

El factor de fricción para dos fases se obtiene de la siguiente ecuación:

$$f_p = \left(\frac{f_p}{f_n} \right) f_n \quad (\text{Ec. 2.174})$$

Donde f_n es el factor de fricción del diagrama de Moody para tuberías lisas. Los autores proponen la siguiente expresión para calcularlo:

$$f_n = \left[2 \log \left(\frac{N_{Re}}{4.5223 \log(N_{Re}) - 3.8215} \right) \right]^{-2} \quad (\text{Ec. 2.175})$$

$$\text{en donde: } N_{Re} = \frac{124 d v_m \rho_{ns}}{\mu_{ns}} \quad (\text{Ec. 2.176})$$

El factor de fricción normalizado (f_{tp}/f_n) es función del colgamiento del liquido $Y_L(0)$, y del colgamiento sin resbalamiento λ y puede obtenerse de la siguiente expresión:

$$\frac{f_{tp}}{f_n} = e^s \quad (\text{Ec. 2.177})$$

$$s = \frac{\ln x}{-0.0523 + 3.182 \ln x - 0.8725(\ln x)^2 + 0.1853(\ln x)^4} \quad (\text{Ec. 2.178})$$

$$x = \frac{\lambda}{Y_L(0)^2} \quad (\text{Ec. 2.179})$$

De sus observaciones Beggs y Brill elaboraron un mapa de patrones de flujo en función de λ y el número de Froude. El patrón de flujo puede determinarse de este mapa como se muestra en la figura 2.24 o de la tabla 2.10.

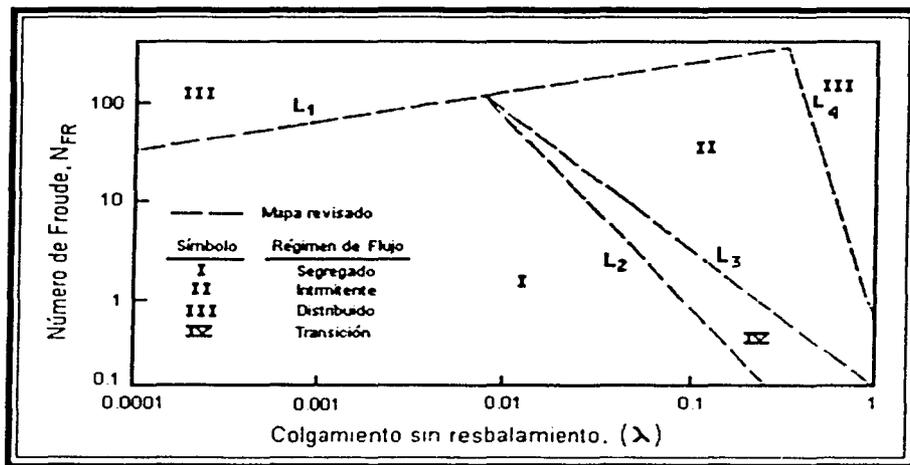


Fig. 2.24-. Mapa de patrones de flujo de Beggs.

Patrón de flujo	Condiciones	
Segregado	$\lambda \leq 0.01$	$N_{FR} < L_1$
	$\lambda \geq 0.01$	$N_{FR} < L_2$
Transición	$\lambda \geq 0.01$	$L_2 < N_{FR} < L_3$
Intermitente	$0.01 \leq \lambda \leq 0.4$	$L_3 < N_{FR} \leq L_1$
	$\lambda > 0.4$	$L_4 < N_{FR} \leq L_4$
Distribuido	$\lambda \leq 0.4$	$N_{FR} \geq L_1$
	$\lambda \geq 0.4$	$N_{FR} > L_4$

Tabla 2.10-. Clasificación de patrones de flujo

donde:
$$N_{FR} = 7734.9 \frac{w_m^2}{\rho_m^2 d^5} \quad (\text{Ec. 2.180})$$

y los parámetros de correlación L_1 , L_2 , L_3 y L_4 se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$L_1 = 316\lambda^{0.302} \quad (\text{Ec. 2.181})$$

$$L_2 = 0.0009252\lambda^{-2.4684} \quad (\text{Ec. 2.182})$$

$$L_3 = 0.10\lambda^{-1.4516} \quad (\text{Ec. 2.183})$$

$$L_4 = 0.5\lambda^{-6.738} \quad (\text{Ec. 2.184})$$

El cálculo del colgamiento real del líquido, se obtiene de la siguiente expresión generalizada:

$$Y_L(o) = \frac{a\lambda^b}{(N_{FR})^c} \quad (\text{Ec. 2.185})$$

donde los coeficientes están en función del régimen de flujo como se muestra en la siguiente tabla:

	a	b	c
Segregado	0.980	0.4846	0.0868
Intermitente	0.845	0.5351	0.0173
Distribuido	1.065	0.5824	0.0609

Fig. 2.11-. Constantes de los patrones de flujo.

En el caso de flujo transitorio, el cálculo del colgamiento real se obtiene de la siguiente manera:

$$Y_L(o) = AY_L(o) \text{ (segregado)} + B_1Y_L(o) \text{ (intermitente)} \quad (\text{Ec. 2.186})$$

$$A = \frac{L_3 N_{FR}}{L_3 - L_2} \quad (\text{Ec. 2.187})$$

$$B_1 = 1 - A \quad (\text{Ec. 2.188})$$

El colgamiento sin resbalamiento (λ) se obtiene con la ecuación:

$$\lambda = \frac{V_{sL}}{V_m} \quad (\text{Ec. 2.189})$$

Procedimiento de cálculo.

Del procedimiento general de cálculo, sólo se modifican los pasos 5 al 8, quedando de la siguiente manera:

- 5- Calcular N_{FR} , λ y los parámetros de correlación L_1 , L_2 , L_3 y L_4 determinando así el patrón de flujo por medio de la tabla 2.10, o de la figura 2.24.
- 6- Calcular el colgamiento real del líquido con la ecuación 2.185; para flujo transitorio obtenerlo de la ecuación 2.186.
- 7- Determinar el valor de E_k con la ecuación 2.172, si se consideran despreciables las pérdidas de presión por aceleración, hacer $E_k = 0$.
- 8- Determinar (f_{tp}/f_n) y f_n con las ecuaciones 2.175 y 2.179.
- 9- Calcular f_{tp} con la ecuación 2.174.
- 10- Obtener $(\Delta P/\Delta L)$ aplicando la ecuación 2.173, y con este valor determinar la ΔL correspondiente a la ΔP supuesta.

Ejemplo.- Aplicando el método de Beggs y Brill, calcular el valor de la ΔL correspondiente a un decremento de presión $\Delta P=50$ (lb/pg²), con una $P_1=800$ (lb/pg²) para las siguientes condiciones:

R	= 2000	(pie ³ /bl)	$\mu_o = \mu_l$	= 3.4725	(cp)
q_o	= 5000	(bl/día)	\bar{Z}	= 0.8662	
\bar{P}	= 775	(lb/pg ² _{abs})	ρ_l	= 50.733	(lb _m /pie ³)
\bar{T}	= 80	°F	B_g	= 0.017066	
Y_o	= 0.7		ρ_g	= 2.9829	(lb _m /pie ³)
Y_{ro}	= 0.85		μ_g	= 0.01225	(cp)
μ_{om}	= 15.18	(cp)	w_g	= 5.0943	(lb _m /seg)
d	= 6	(pg)	w_o	= 18.3391	(lb _m /seg)
R_s	= 270.76	(pie ³ /bl)	w_m	= 23.4334	(lb _m /seg)
Y_{od}	= 0.9156		λ	= 0.17463	
B_o	= 1.1125				

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los pasos 5 a 10; el paso 7 no se incluye porque se consideran despreciables las pérdidas de presión por aceleración.

Paso	Parámetros	Resultado	Observaciones
(5)	N_{FR} λ L_1 L_2 L_3 L_4	4.2614 0.1747 186.556 0.0687 1.2593 63903.2425	
(6)	$Y_L(0)$ x s	0.3239 1.6646 0.2968	Flujo intermitente
(8)	(f_{tp}/f_n) N_{Re} f_n	1.3455 143947.425 0.017401	$V_m = 10.5379$ $\mu_{ns} = 0.6165$
(9)	f_{tp}	0.0234	
(10)	$(\Delta P/\Delta L)$ ΔL	0.0064 7863.7328	$E_k = 0$

Tabla 2.12-. Resultados de los pasos 5 a 10 de la Correlación de Beggs y Brill.

Correlación de Dukler.

Este método involucra el cálculo del colgamiento de líquido aun cuando las pérdidas de presión por aceleración se consideren despreciables.

En su correlación, Dukler desarrolla un procedimiento para obtener un factor de fricción normalizado para las dos fases y el colgamiento real del líquido.

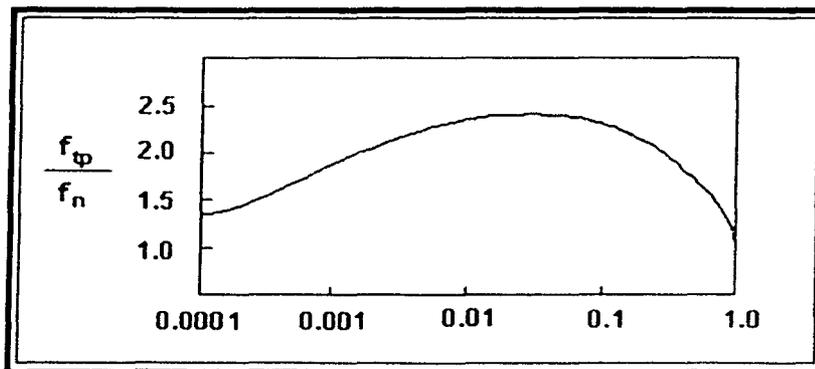


Fig. 2.25-. Factor de fricción para dos fases.

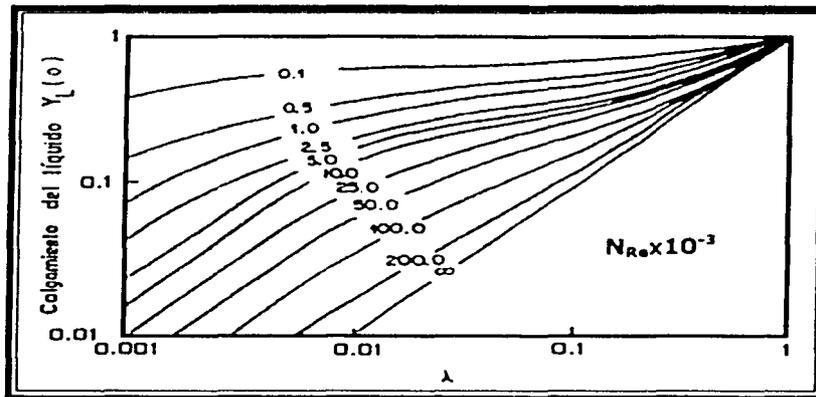


Fig. 2.26-. Colgamiento en tubería horizontal.

Esta correlación, al igual que otra cualquiera, justifica su aplicación en la misma medida en que sus resultados se apeguen a los medidos a condiciones de operación en el campo.

La expresión general para el cálculo del gradiente de presión es:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 0.0012939 \frac{f_{fp} \rho'_m v_m^2}{d} + \frac{1}{4633 \Delta L} \Delta \left[\frac{\rho_g v_{fg}^2}{1 - Y_L(o)} + \frac{\rho_L v_{sl}^2}{Y_L(o)} \right] \Delta P \quad (\text{Ec. 2.190})$$

$$\rho'_m = \frac{\rho_L \lambda^2}{Y_L(o)} + \frac{\rho_g (1 - \lambda)^2}{1 - Y_L(o)} \quad (\text{Ec. 2.191})$$

$$E_t = \frac{1}{4633} \Delta \left[\frac{\rho_g v_{fg}^2}{1 - Y_L(o)} + \frac{\rho_L v_{sl}^2}{Y_L(o)} \right] \quad (\text{Ec. 2.192})$$

con lo que la expresión se reduce a:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 0.0012939 \frac{f_{fp} \rho'_m v_m^2}{d (1 - E_t)} \quad (\text{Ec. 2.193})$$

Procedimiento de cálculo.

De igual forma que en el método anterior este sufre modificación en los pasos 5 al 8, estos son:

5- Calcular el colgamiento, $Y_L(o)$, de la siguiente manera:

- a) Obtener la viscosidad de la mezcla con la ecuación 2.155.
- b) Suponer un valor de colgamiento del líquido, $Y_L(o)$.
- c) Determinar el valor de la densidad de la mezcla, ρ'_m , con la ecuación 2.191
- d) Obtener el N_{Re} con la ecuación 2.176.
- e) Obtener un $Y_{Lc}(o)$ con la ecuación 2.198, si $|Y_{Lc}(o) - Y_{Ls}(o)| < 0.001$, calcular un nuevo valor de ρ'_m y N_{Re} y continuar con el paso 6. En caso contrario, hacer $Y_{Ls}(o) = Y_{Lc}(o)$ y repetir el procedimiento hasta el inciso c.

6- Si las pérdidas de presión por aceleración se consideran despreciables hacer $E_k = 0$ y continuar al paso 8. De otra forma, se obtendrá el valor de E_k con la ecuación 2.192, en cuyo caso será necesario obtener los valores de ρ_g , ρ_L , v_{sg} , v_{sL} y $Y_L(o)$ a P_1 y P_2 , respectivamente.

7- Obtener f_n y f_{tp}/f_n a partir de las siguientes ecuaciones:

$$f_n = 0.0056 + 0.5(N_{Re})^{-0.32} \quad (\text{Ec. 2.194})$$

$$\frac{f_{tp}}{f_n} = 1.076587 - 2.182034x - 0.937941x^2 - 0.101785x^3 \quad (\text{Ec. 2.195})$$

$$x = \log(\lambda) \quad (\text{Ec. 2.196})$$

$$f_{tp} = \left(\frac{f_{tp}}{f_n} \right) f_n \quad (\text{Ec. 2.197})$$

8- El colgamiento $Y_L(o)$ se puede obtener por medio de gráfica o con las siguientes ecuaciones:

para $0.1 \leq \lambda \leq 1.0$

$$Y_L(o) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x^2 + b_3 x^3 + b_4 x^4 \quad (\text{Ec. 2.198})$$

$$x = 10 \lambda - 2.107 \quad (\text{Ec. 2.199})$$

$$b_0 = 0.469609 - (0.138040)Z - (0.027481)Z^2 + (0.003537)Z^3 - (0.024212)Z^4 + (0.01097)Z^5 + (0.027187)Z^6 - (0.019885)Z^7 + (0.004693)Z^8 + (0.004295)Z^9 \quad (\text{Ec. 2.200})$$

$$b_1 = 0.106343 + (0.001065)Z - (0.00349)Z^2 - (0.002214)Z^3 + (0.002365)Z^4 + (0.00567)Z^5 - (0.000726)Z^6 + (0.000127)Z^7 \quad (\text{Ec. 2.201})$$

$$b_2 = -0.015214 + (0.004208)Z + (0.006524)Z^2 + (0.000246)Z^3 - (0.00127)Z^4 - (0.00028)Z^5 + (0.000105)Z^6 \quad (\text{Ec. 2.202})$$

$$b_3 = 0.001994 + (0.000064)Z - (0.000572)Z^2 - (0.00002)Z^3 \quad (\text{Ec. 2.203})$$

$$b_4 = -0.000144 + (0.000016)Z + (0.000083)Z^2 - (0.000133)Z^3 + (0.000043)Z^4 - (0.000042)Z^5 - (0.000028)Z^6 + (0.000106)Z^7 + (0.000003)Z^8 - (0.000022)Z^9 \quad (\text{Ec. 2.204})$$

$$Z = \log(N_{Re}) - 4.0176 \quad (\text{Ec. 2.205})$$

para $0.01 \leq \lambda \leq 0.1$

$$Y_L(o) = b_0 + b_1 \lambda \quad (\text{Ec. 2.206})$$

para $0.006 \leq \lambda \leq 0.01$

$$b_0 = 0.7464444 + (0.402593)x - (0.459559)x^2 + (0.112758)x^3 - (0.008571)x^4 \quad (\text{Ec. 2.207})$$

$$b_1 = 0.037791 + (0.091513)x + (0.205683)x^2 + (0.390756)x^3 + (0.47075)x^4 - (0.230195)x^5 + (0.023875)x^6 \quad (\text{Ec. 2.208})$$

para $0.003 \leq \lambda \leq 0.006$

$$b_0 = 0.800301 + (0.386447)x - (0.524572)x^2 + (0.140726)x^3 - (0.011543)x^4 \quad (\text{Ec. 2.209})$$

$$b_1 = 0.110852 + (0.254436)x + (0.54049)x^2 + (0.966715)x^3 + (1.080144)x^4 - (0.594425)x^5 + (0.067371)x^6$$

(Ec. 2.210)

para $0.0017 \leq \lambda \leq 0.003$

$$b_0 = 0.844298 + (0.363485)x - (0.575184)x^2 + (0.165097)x^3 - (0.014327)x^4$$

(Ec. 2.211)

$$b_1 = 5.37305 + (11.209496)x + (13.672301)x^2 - (6.758896)x^3 + (0.71421)x^4$$

(Ec. 2.212)

para $0.001 \leq \lambda \leq 0.0017$

$$b_0 = 0.691545 + (0.260211)x - (0.494243)x^2 + (0.155236)x^3 - (0.014659)x^4$$

(Ec. 2.213)

$$b_1 = 107.430534 + (62.558994)x - (36.118309)x^2 + (1.293692)x^3 + (0.581947)x^4$$

(Ec. 2.214)

La variable independiente de los coeficientes b_0 y b_1 para el intervalo $0.001 \leq \lambda \leq 0.01$ es equivalente al logaritmo del N_{Re} y esto es:

$$X = \log (N_{Re})$$

(Ec. 2.215)

Ejemplo: Empleando el método de Dukler, calcule el valor de ΔL correspondiente a un decremento de presión de 50 (lb/pg²), con los datos del ejemplo anterior.

Solución:

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la aplicación de este método.

Paso	Parámetros	Resultado	Observaciones
(5)	μ_{ns}	0.6165	Valor supuesto $V_m = 10.5379$ (pies/seg)
	$Y_L(o)$	0.2500	
	ρ'_m	8.898	
	N_{Re}	113155.407	
	$Y_L(o)$	0.2558	Valor calculado
	ρ'_m	8.7779	
	N_{Re}	111626.326	
	$Y_L(o)$	0.2570	Valor calculado
	ρ'_m	8.7546	
	N_{Re}	111329.378	
	$Y_L(o)$	0.2572	Valor calculado
	(6,7)	f_n	0.017735
(f_{tp}/f_n)		2.2359	
f_{tp}		0.0397	
(8)	$(\Delta P/\Delta L)$	0.008323	
	ΔL	6007.3866	(pies)

Tabla 2.13-. Resultados de los pasos 5 a 8 de la Correlación de Dukler.



Capítulo III

**Técnicas para el diseño
de un sistema tutorial.**

Aspectos generales

La educación asistida por computadoras, es una disciplina en pleno crecimiento, no sólo por el interés y múltiples aplicaciones que se han suscitado en las escuelas, universidades y centros de entrenamiento empresarial; sino porque ha permitido iniciar un camino difícil pero fructífero al incorporar esta herramienta al proceso educativo.

La versatilidad de la tecnología de la computación, permite ayudar al proceso del aprendizaje en múltiples sentidos: memorizando, practicando, entendiendo el planteamiento de problemas, etc. Las formas que toman estos procesos se siguen innovando día a día: control de audiovisuales, laboratorios, máquinas de simulación, diseño gráfico, etc. Para lo anterior emplea diferentes técnicas que van desde la programación tradicional, hasta el manejo de sonidos y gráficas, animación computadorizada, bases de datos y muchas más técnicas entre las que destacan las de inteligencia artificial.

El diseño y modificación de módulos educativos computadorizados, debe ser parte de la formación de la gente que está íntimamente vinculada con la educación llegando a ser ésta una de sus actividades cotidianas.

El problema fundamental del diseño de estos programas no reside tanto en la dificultad de la programación misma, ya que se cuenta con la ayuda de paquetes, lenguajes y otras herramientas, que facilitan esta tarea, el problema reside en la concepción y diseño, la complejidad radica en el qué poner y cómo llevarlo a cabo.

Los métodos computacionales y el conocimiento.

Es un hecho reconocido por todos, que las computadoras como dispositivos y la computación como ciencia ha traído muchísimos beneficios dentro de las actividades humanas. Los beneficios son tan tangibles como que nos ayudan a manejar más y mejor la información. De cierta manera los procesos más importantes con la información son: sistematizar, almacenar, recuperar de manera rápida y

selectiva la información; procesar, visualizar, analizar, sintetizar, ordenar la información, etc. y en forma general automatizar algunos pasos o procesos que tienen que ver con la información.

Actualmente se incorpora a la informática el procesamiento del conocimiento; el conocimiento es algo más que datos o información, es el saber qué hacer con los datos y con la información. Así la computación tiene la posibilidad de trabajar no solamente con datos o con información, sino también con lo que permite elaborar la información, es decir el conocimiento.

Sin pretender definir aquí a la educación, es bien sabido que la educación es un proceso de crecimiento de las personas, que tiene que ver con el aprendizaje y el conocimiento. Definitivamente la informática es un instrumento, pero también la informática es una ciencia que trata de procesar incrementar y corregir al conocimiento, esto nos lleva al aprendizaje.

Aprendizaje, enseñanza e instrucción.

El aprendizaje es la facultad de adaptarse al mundo exterior, por lo tanto el aprendizaje exige memoria, el recordar situaciones, hechos, etc., del pasado para enfrentarse ante situaciones similares del presente o prever las futuras. La enseñanza presupone la comunicación entre personas, por medio de la cuál alguien transmite un conocimiento a otros, también puede ser directa entre las personas o a través de un medio como los libros, la televisión o la computadora.

El aprendizaje no necesariamente pasa por la enseñanza; la experiencia, el auto - aprendizaje, el descubrimiento, la reflexión, la creatividad y la investigación son formas de aprendizaje que no pasan por la enseñanza, entonces, la enseñanza es sólo un medio o camino para llegar al aprendizaje y no un fin.

El concepto de instrucción es aún más restringido que el de enseñanza, ya que instruir implica inducir a un sujeto en un proceso de imitación, por ejemplo, se instruye cómo

hacer algo, se dan las órdenes o las recetas de como lograrlo, pero no necesariamente el conocimiento del por qué eso se hace así, lo que sería una enseñanza propiamente dicho.

La tecnología de la informática puede ayudar o asistir tanto al aprendizaje como a la enseñanza o a la instrucción; dado que el aprendizaje es más global o general que la enseñanza y que ésta abarca aún más que la instrucción, se prefiere el término de aprendizaje asistido por computadora, el cual se refiere al conjunto de tecnologías, dispositivos aplicados y derivados de la computación o informática, que pueden ayudar al proceso del aprendizaje, sin embargo muchos autores siguen manejando los términos: enseñanza asistida por computadora, o el de instrucción asistida por computadora.

La conveniencia de introducir tecnología para el aprendizaje tiene muchas finalidades, pero está presente también el problema económico del costo de la educación; con estas tecnologías se pretende abatir los costos y poner la educación accesible a todos.

Esto último tiene particular interés en aquellos países con escasa infraestructura escolar o en los que la población se encuentra aislada geográficamente o son de difícil acceso. Actualmente se plantea el hecho de incorporar tecnología en aquellas áreas del conocimiento donde el reclutamiento de maestros es difícil o escaso, como es el caso de matemáticas o ciencias, en educación especial es particularmente útil esta tecnología, ya que el número y tipo de estímulos que necesitan los estudiantes minusválidos deben ser muy grandes y variados, sabiendo que la velocidad de aprendizaje es muy diferente para cada individuo.

También es importante introducir la tecnología en cursos de entrenamiento o adiestramiento profesional dentro de empresas, donde el dar un curso emplearía mucho tiempo a los empleados o donde sólo se tiene que adiestrar a unos pocos de ellos, lo cual no se justificaría o saldría muy caro con un adiestramiento tradicional.

Finalmente, se piensa que la tecnología puede mejorar en forma sustancial la calidad de la educación, tradicionalmente medida ésta a través de índices de aprovechamiento, retención, disminución de la reprobación, etc., pero que también debería ser valorada por otros criterios como la satisfacción en el aprendizaje, la aplicación a otros contextos de lo adquirido, etc.

El problema fundamental de estas tecnologías para la educación, es el hacerlas efectivas, que se empleen y tengan un impacto significativo.

Para que se empleen estas tecnologías deben de:

- Ser accesibles, en algunos casos significa que sean baratas.
- Fácil adaptación a la enseñanza y a su evolución.
- Existencia de recursos humanos preparados para emplearlas y aprovecharlas.

La adaptación de las tecnologías a la enseñanza, sus particularidades y evolución, significa un reto que va más allá de la adecuación del contenido en un momento dado. Es necesario llevar a cabo monitoreos de esta tecnología para identificar posibles problemáticas en cuanto al aprendizaje.

El tener recursos humanos preparados y entusiastas para utilizar la tecnología, implica algo más que libros o alfabetización computacional de los maestros y estudiantes, se necesitan personas motivadas e interesadas en mejorar el sistema educativo empleando esta vía, si ya se tiene el personal también es necesario que el material educativo sea interactivo y fácil de utilizar, para garantizar así el poder concentrarse en el contenido y no en la forma.

El camino para preparar recursos humanos en el uso de nuevas tecnologías es, llevando la tecnología a las instituciones educativas y fomentando su uso y familiarización tanto en docentes como en alumnos. Las tecnologías educativas en buena medida se han quedado en las formas tradicionales de su empleo, sin embargo, dado el potencial de esta tecnología computacional, que

no se reduce a presentar el conocimiento sino también a procesarlo, se tiene la esperanza de que pueda ser altamente innovador.

Formas del aprendizaje asistido por computadora.

La clasificación que se indicará a continuación es la más aceptada ya que mezcla los enfoques en un sólo rubro, por eso se prefiere manejarlo como modalidades y no como una clasificación, ya que no existe un criterio único que permite separarlas.

Generalmente se engloban tres enfoques: el de tutor, aprendiz y herramienta, dentro de la enseñanza asistida por computadora o de la instrucción asistida por computadora, aunque en estricto sentido sólo el enfoque del tutor es de instrucción o enseñanza, los otros dos enfoques: aprendiz y herramientas, corresponden a formas de aprendizaje asistido por computadora.

Estos enfoques, no son formas concretas o productos específicos, sino el énfasis en la relación del sujeto con la computadora en la educación. Como formas o modalidades concretas de la enseñanza asistida por computadora, la mayoría de los autores están de acuerdo en clasificarlas de la siguiente forma:

- Tutorial.
- Ejercitación y práctica.
- Juegos.
- Simulaciones.
- Herramientas.
- Descubrimiento.

La modalidad tutorial, trata de presentar un material en la pantalla de la computadora y eventualmente hace preguntas sobre dicho material. En las versiones avanzadas de tutoriales, las preguntas se convierten en evaluaciones más o menos complicadas, dependiendo de las cuales aparece una retroalimentación diferente y se toma un camino alternativo para continuar con la presentación del material.

La modalidad de ejercitación y práctica, trata de que los usuarios adquieran una habilidad sobre algo, realizando ejercicios únicamente, es decir, no se propone una teoría o explicación sobre el contenido de lo que se está haciendo, bajo el supuesto que esto ya se conozca y que con esta modalidad lo que se hace es la labor de reforzamiento de lo aprendido y el adquirir o mejorar una habilidad, por ejemplo en la resolución de ejercicios aritméticos.

Las modalidades de juegos, son aquellos programas en que emplea algún recurso divertido y cuya finalidad aparente es el entretenimiento, desafío o diversión y la finalidad escondida es que el usuario o jugador aprenda algo, practique o desarrolle alguna habilidad.

Para lograr jugar o participar en el mismo hay que conocer, practicar, o desarrollar conocimientos, habilidades, etc. Sin duda alguna, ésta es la modalidad más difícil de describir y de realizar, puesto que se trabaja en dos planos simultáneamente, el del entretenimiento y el del aprendizaje.

La parte didáctica del juego, puede estar en el contenido, en la habilidad para manejar el juego o en el conocimiento asociado a las variantes del juego. Muchos juegos emplean a la simulación, que se describirá a continuación, como un medio para expresar el juego y hacerlo más interesante.

La modalidad de simulación, es cuando se emplea la computadora para presentar una escena cambiante en el tiempo. Generalmente esta escena es hecha mediante animación gráfica, a colores y con sonidos, pero no necesariamente. Lo importante de una simulación es el tratar de representar un fenómeno real, dinámico o cambiante en el tiempo.

La simulación permite por ejemplo: el adquirir la habilidad o el aprender las reglas para manipular un fenómeno, mecanismo o dispositivo dinámico y complejo, también permite el entender la dinámica compleja de una situación y ser entrenado en este tipo de medio ambiente. Finalmente la simulación permite en algunos casos el

experimentar situaciones, del tipo; qué pasa si..., donde se ensayan las hipótesis y aparece el resultado.

Otro ejemplo de la modalidad de simulación, es emplearla para ensayar en la computadora experimentos de laboratorios de química y otros. La dinámica puede presentarse en gráficas comparativas o ser presentada como dibujos animados. Las simulaciones son a veces divertidas, pero a veces no lo son tanto, sin embargo, ese no es su objetivo como en los juegos.

La modalidad de herramientas, son aquellos paquetes o aplicaciones preprogramadas, o cualquier recurso de cómputo, que sirve de auxiliar a las tareas educativas o de enseñanza, pero cuya finalidad no es enseñar algo, sino realizar algo. Así por ejemplo un procesador de textos, permite escribir textos y actualmente todo lo asociado a la escritura, que va desde el diseñar un bosquejo, verificar la ortografía y la gramática hasta incorporar dibujos y preparar una publicación.

Aquí la enseñanza consiste en aprender lo sofisticado que puede ser una aplicación, el aprender a utilizar el paquete mismo y entender las relaciones en la información propia, de la aplicación por lo que sí se emplean en la educación, ésta saldrá sin duda beneficiada. Así por ejemplo, si a los estudiantes se les pide que realicen sus tareas o deberes en un procesador de texto, estas deberían salir mejor que si es realizado manualmente.

Lo más conocido de estas herramientas son las llamadas herramientas de cuarta generación: procesadores de texto, hojas de cálculo, manejadores de bases de datos y paquetes gráficos.

Sin embargo hay muchos otros ejemplos de uso educativo y esto no es limitado, ni limitativo a la educación. Estos van desde paquetes estadísticos, hasta paquetes que dan solución a ecuaciones y generadores de ideas. En un sentido amplio de la palabra, la programación es también una herramienta, aunque se prefiere dejar a la programación en la modalidad de descubrimiento.

experimentar situaciones, del tipo; qué pasa si..., donde se ensayan las hipótesis y aparece el resultado.

Otro ejemplo de la modalidad de simulación, es emplearla para ensayar en la computadora experimentos de laboratorios de química y otros. La dinámica puede presentarse en gráficas comparativas o ser presentada como dibujos animados. Las simulaciones son a veces divertidas, pero a veces no lo son tanto, sin embargo, ese no es su objetivo como en los juegos.

La modalidad de herramientas, son aquellos paquetes o aplicaciones preprogramadas, o cualquier recurso de cómputo, que sirve de auxiliar a las tareas educativas o de enseñanza, pero cuya finalidad no es enseñar algo, sino realizar algo. Así por ejemplo un procesador de textos, permite escribir textos y actualmente todo lo asociado a la escritura, que va desde el diseñar un bosquejo, verificar la ortografía y la gramática hasta incorporar dibujos y preparar una publicación.

Aquí la enseñanza consiste en aprender lo sofisticado que puede ser una aplicación, el aprender a utilizar el paquete mismo y entender las relaciones en la información propia, de la aplicación por lo que sí se emplean en la educación, ésta saldrá sin duda beneficiada. Así por ejemplo, si a los estudiantes se les pide que realicen sus tareas o deberes en un procesador de texto, estas deberían salir mejor que si es realizado manualmente.

Lo más conocido de estas herramientas son las llamadas herramientas de cuarta generación: procesadores de texto, hojas de cálculo, manejadores de bases de datos y paquetes gráficos.

Sin embargo hay muchos otros ejemplos de uso educativo y esto no es limitado, ni limitativo a la educación. Estos van desde paquetes estadísticos, hasta paquetes que dan solución a ecuaciones y generadores de ideas. En un sentido amplio de la palabra, la programación es también una herramienta, aunque se prefiere dejar a la programación en la modalidad de descubrimiento.

Frecuentemente se asocia también como una modalidad *e/ descubrimiento*. Se entiende por descubrimiento al conjunto de programas que permiten que el usuario aprenda algo por inferencia, deducción, etc. descubriéndolo por sí mismo y no presentado directamente. En la mayoría de las simulaciones y juegos se aprende de esta manera. El objetivo de esta modalidad es facilitar la creatividad del individuo, la capacidad de generación y de entender haciendo.

Actualmente también se habla como objetivo del descubrimiento el de estimular el pensamiento crítico. Así por ejemplo, si se dan los instrumentos adecuados y un mínimo de técnica se podría en algunos casos, que el usuario dedujera alguna de las leyes de un fenómeno, donde se presenta la problemática de manera muy didáctica.

Diseño de material educativo computarizado.

Se entiende por material educativo computarizado a los programas y eventualmente al material o equipo computarizado asociado, que permite o cuya finalidad es la enseñanza - aprendizaje.

Desde nuestro punto de vista es muy importante el aprender a diseñar el material educativo computarizado, porque estamos convencidos de que será ésta una de las formas más extendidas de comunicar el conocimiento en el futuro cercano, por lo que se habrá que re-codificar los textos y otras formas de difusión del conocimiento en términos de estas herramientas.

Ya se tiene bastante experiencia acumulada en el diseño del material educativo computarizado, como para poder destacar algunas ideas o estrategias valiosas en el diseño y realización. También cabe señalar que el diseño de estos materiales depende en gran medida de la sensibilidad del autor.

La visión enfocada al aprendizaje asistido por computadora.

El autor y el maestro.

El aprendizaje asistido por computadora es aún un fenómeno en busca de seis teorías. Esto es debido a que desde hace mucho, un gran número de personas y organizaciones se han comprometido en los aspectos teóricos, técnicos y prácticos del aprendizaje asistido por computadora (AAC), que anteriormente se restringía a enseñanza o instrucción asistida por computadora, pero sin desarrollar aspectos más teóricos.

Mucho se ha avanzado desde entonces, pero falta también mucho por hacerse, específicamente en el campo del aprendizaje. Existe una inmensa literatura en el campo, que principalmente describe ejemplos exitosos de lecciones y módulos del AAC, con distintos niveles de profundidad y complejidad evalúa los diferentes enfoques en diferentes situaciones, sin tener una visión unificada del campo.

Tradicionalmente se censura al AAC como un elemento rígido, sin la flexibilidad que provee, por un lado los libros de texto y por otro lado el contacto con el maestro. De un libro se dice que perdería la riqueza del vocabulario, la variedad en el tipo de preguntas, ejercicios y proyectos, el poder regresarse en un libro a una página anterior o saltarse a una posterior o finalmente cerrar el libro cuando uno quiera.

Por otra parte se censura al AAC, indicando que se perdería del maestro, del poder adaptar una lección sobre la marcha, cambiar un discurso adecuándolo al auditorio y al momento, repetir de una u otra manera si algo no se entiende, el presentar ejemplos contrastantes o casos hipotéticos, el preguntar a su auditorio. Igualmente se perdería la espontaneidad personal, el movimiento para saber captar la atención del auditorio, el humor, el colorido y la variedad que podría presentar una relación humana.

Actualmente, mediante las comunicaciones, teleconferencias, el correo electrónico, el uso de tableros electrónicos, chat, etc., se pueden recuperar parte de la espontaneidad y diálogo humano, que en un programa de cómputo no puede proporcionar.

El rápido desarrollo de la tecnología, ha brincado los obstáculos que se le han interpuesto para el uso de la computación en la educación. Con esto se vislumbra un enorme impacto tecnológico en la educación, que ya nadie duda.

El problema no es ahora el tener la computadora en la escuela, sino la tecnología para emplearla adecuadamente en la educación.

Debido a las múltiples modalidades y al conocimiento computacional, pedagógico y de la materia en sí que va a ser enseñada, no se ha definido bien cuál es el perfil ideal o funciones de un autor de un módulo de AAC.

Así, en la década de los 70's, se hablaba no de autor, sino de un programador de material instruccional, ya que lo más complicado se pensaba, estaba en la programación y no tanto en el contenido de lo que se iba a enseñar.

Posteriormente con el uso de sistemas y lenguajes de autor, se modificó el énfasis de productor de material instruccional, a una persona que realiza trabajos y tareas de análisis, establece objetivos, analiza criterios de pruebas, desarrolla las guías de curso y los puntos de enseñanza, en fin, escribe los pasos de un plan para una lección.

Todo parecería que es muy similar al hecho de preparar una clase normal por un profesor, sin embargo, esto presenta diferentes aspectos que lo hacen mucho más difícil y requieren de habilidades que no necesariamente todo programador o analista de sistemas tiene.

El diseño de material AAC, es más que un programa (software) y debe de presentar ventajas respecto a otros medios de instrucción y esto debe de quedarle muy claro al autor, a los patrocinadores y a los sujetos del curso

que de esta manera estarán más motivados a estudiar bajo la modalidad de AAC, que por los medios tradicionales.

Según Kearsley⁽⁷⁾, el uso de computadoras, no es tan útil si se necesita presentar mucho texto, o mucha información gráfica. Los libros y los videos aventajan aún a las computadoras en estos aspectos. Los estudiantes generalmente tienen la impresión de que las computadoras son ventajosas respecto a otros medios debido a que:

- Manejan grandes cantidades de información.
- Manejan dicha información de manera más barata.
- Dan una presentación más conveniente, compacta.
- Mezclan diferentes medios: sonido, gráficos y texto.
- Responden rápidamente a preguntas, evitando búsquedas.
- Tienen una mejor calidad en cuanto a figuras o animación con buena definición de la imagen y colores.
- Controlan otros medios como disco compacto, aparatos de medida de laboratorio, etc.

Las computadoras compiten por el momento, de manera desventajosa en presentar información realista: como los videos, transparencias, fotografías o secuencias de eventos filmados.

La división de lo que es mejor a realizarse con computadora cambia dinámicamente, un ejemplo de esto es que actualmente las computadoras son ya muy buenas como medios para realizar textos y documentos, cálculos en tablas, la recuperación y cruzamiento de información, el control de otras máquinas, etc.

Pero antes de que existieran estos programas o dispositivos, no lo era así. Las computadoras, en la actualidad son muy superiores a cualquier otro medio en cuanto a:

- Interacción.

⁽⁷⁾ Referencias al final.

- Manejo de la complejidad.
- Adecuación a las personas.

La interacción se refiere al diálogo entre la computadora y el usuario.

Es claro que tiene ventaja, cuando se requiera de muchas respuestas a preguntas y maneras de seguir el desarrollo de algo, esta superioridad proviene del hecho de que las computadoras, programadas adecuadamente, pueden responder con muchísima rapidez; pueden almacenar enormes cantidades de respuestas y preguntas dentro de la memoria y obtener una retroalimentación casi inmediata.

En particular el uso de la computadora se adecua a la explicación de procesos complejos. Así el éxito de la computadora radica en la enseñanza de cuestiones complejas como la resolución de problemas y el adquirir habilidades en la toma de decisiones.

Existen dos clases de ventajas en el uso de computadoras para tomarse en cuenta para el diseño de los objetivos, aquellas que provee directamente la computadora y sus periféricos ("hardware") y aquellas indirectas de utilidad pedagógica.

Dean⁽⁵⁾ cita las siguientes funciones de la computadora:

- Presentar texto
- Dialogar interactivamente
- Realizar cálculos
- Manejar índices
- Controlar otros dispositivos
- Presentar sonido
- Imprimir directamente

Así mismo Dean⁽⁵⁾ cita las siguientes funciones pedagógicas:

- Proveer en cualquier momento ayuda.

⁽⁵⁾ Referencias la final.

- Generar problemas numéricos.
- Presentar al azar problemas selectos de un mismo tópico.
- Poder dar más práctica y ejercitación a petición del estudiante.

¿Que es un Tutorial?

En esencia una lección tutorial en computadora es un programa que enseña alguna información a un estudiante; el modo tutorial o lección tutorial es una modalidad del rol tutorial, aunque la ejercitación y práctica también forman parte de esto.

En una primera instancia, parecería que el modo tutorial es como un libro electrónico, o peor aún como un sistema que solo permite cambiar las páginas del libro, que aparece en la pantalla.

Como ya se indicó eso sería muy aburrido y cansado a la vista, además sería más caro que un libro y por tanto menos práctico. Un libro por ejemplo, se puede llevar a donde sea e incluso leerlo en el metro o en un autobús, mientras que una computadora personal no, por lo que resulta menos práctico. Si se tuviera solamente un libro electrónico no se estarían aprovechando las ventajas de interactividad de la computadora personal.

Existen en el mercado algunos libros electrónicos para ser utilizados en computadoras o terminales externas conectadas también a una computadora. Un ejemplo de esto es la comercialización de una versión de la Biblia o partes de ella, cuya finalidad sería la consulta rápida de algún versículo sin tener que buscarlo. De igual manera, existen ya las enciclopedias electrónicas, diccionarios, etc. Igualmente existen desde hace muchos años, diversos bancos de datos con información de lo más diversa que pueden ser consultados desde una terminal remota.

Todos estos libros electrónicos que existen, por diversas razones no son una aplicación en modo tutorial sino herramientas de consulta. Claro está, a través de la consulta se puede aprender, pero el objetivo de una

consulta no es necesariamente el aprender algo y menos aún el inculcarlo como enseñanza.

Las aplicaciones tutoriales, no muestran únicamente información al estudiante esperando que éste las absorba al sólo verlas en la pantalla, sino que tome ventaja de la interactividad, para mostrar información, consultar, respondiendo, preguntando y evaluando.

De esta manera siempre está presente el siguiente proceso:

- Presentar la información en la computadora.
- Pedir responder a alguna pregunta o problema relacionada con la información que se le acaba de presentar.
- Evaluar la respuesta de acuerdo a criterios específicos.
- Determinar qué hacer o a donde continuar de acuerdo a la evaluación.

Un ejemplo de esto es cuando al alumno se le presentan las partes internas de una computadora: Microprocesador, tarjeta madre, tarjetas de sonido y video, memoria RAM, etc. A continuación se le pide al alumno que nombre las partes de una computadora, o se le pregunta si los periféricos forman parte interna o no de la computadora. Si el estudiante acierta, se le hace saber su puntuación, en caso de falla, dependiendo del error, podría repasar la lección o solo una parte de esta e intentar de nuevo resolver la prueba.

Es por lo anterior que el modo tutorial se asemeja más al libro de texto programado. Sin embargo en el modo tutorial se trata no sólo de que el estudiante aprenda algo aislado, sino que trata de guiar al estudiante, llevando la instrucción hacia el logro de los objetivos del aprendizaje. Por esta razón es en general más difícil el hacer una buena lección tutorial que una buena de ejercitación y práctica, por esta razón que también hay pocas lecciones tutoriales de calidad.

En cuanto a cuando se puede llevar a cabo un tutorial aquí las opiniones difieren, hay quienes piensan que las

lecciones tutoriales deben de evitarse, otros reconociendo su dificultad en lograr un buen impacto mediante esta modalidad recomiendan que se emplee las lecciones tutoriales cuando no es factible emplear otra herramienta o modalidad: juegos, simulación, ejercitación y práctica. Otros sin embargo piensan que el tutorial se debe de emplear siempre que se trate de enseñar información nueva.

Para entender mejor el ámbito de aplicaciones deseables del modo tutorial conviene referirse a las cinco categorías del aprendizaje de Gagné:

1- Las habilidades intelectuales. Que a su vez se dividen en tres categorías: diferencias, conceptos y reglas:

Las diferencias son el aprender a distinguir o discriminar un objeto, evento o símbolo frente a otros, tanto dentro de su misma categoría como enfrentado a otras categorías. Se requiere de la elaboración de la noción de grupo y de asociación. Dado que se trata solamente de memorizar la diferencia y la asociación, entonces se cae dentro del dominio del modo de ejercitación y práctica.

Los conceptos son explicaciones que se refieren: a la definición de lo que es algo o de lo que no es, su relación con el medio ambiente y sus partes. Gagné postula que el aprendizaje de conceptos fundamentalmente permite clasificar objetos, eventos y símbolos que no han sido presentados previamente.

Es decir gracias al entendimiento de su definición es posible el clasificarlos. Se requiere la elaboración de las nociones de conjunto, pertenencia, intersección, conjunción, disyunción, sistema, medio ambiente, etc. Este es un dominio por excelencia del modo tutorial. La estrategia consistiría en presentar en un principio una explicación, la presentación de ejemplos y no ejemplos, tal vez excepciones y porqué son excepciones, seguido de una práctica en clasificar ejemplos que no hayan sido presentados.

Las reglas es otra forma del aprendizaje, en la que además de entender un concepto, es posible el operarlo o

ponerlo en servicio de otra cosa. Así las reglas son procedimientos empleados para utilizarlos en algo, resolver un problema o llevar a cabo una tarea. Es el cómo hacer algo. Ejemplos de reglas son el uso de un aparato, las reglas ortográficas, las reglas para encontrar la derivada de una función matemática, etc.

La estrategia que propone Merrill y Bunderson es: presentar la regla, demostrar la aplicación de la regla en ejemplos divergentes, suministrar problemas o ejemplos diferentes para que el estudiante practique la regla y se le dé retroalimentación inmediata. Aunque la simulación es el modo por excelencia de esta habilidad intelectual, es posible el aplicar el modo tutorial, cuando las reglas son sencillas.

2- Estrategias Cognoscitivas o de Resolución de Problemas. Es el entrenar al estudiante a generar soluciones ante problemas nuevos dentro del mismo dominio de aplicación. Se supone que en este dominio no hay unas reglas a seguir estrictamente, sino criterios o estrategias. Es un proceso creativo que debe llevar al estudiante a descubrir o inferir reglas de un nivel más alto.

Ejemplos de éstos son el escribir un poema o partitura musical, el resolver ecuaciones de integración y diferenciales de manera analítica, inventar un producto o una teoría, etc. Aquí no sólo los problemas son diferentes sino que también incluye situaciones distintas. Este es el dominio de los modos de simulación, los juegos y los paquetes de descubrimiento e incluso de algunas herramientas.

3- Información verbal. Se refiere a la habilidad de expresar, explicar, hacer comprensible una idea. Esta habilidad tampoco tiene reglas explícitas, ya que no se trata de repetir algo al pie de la letra, sino que en última instancia se desarrolle un estilo propio de comunicación y de adaptación a un auditorio. El ser autor de textos y en particular de material AAC sería el dominio por excelencia de esto.

El uso de computadoras por el momento es limitado en este dominio, tal vez al uso de correctores gramaticales, bancos de información y otras herramientas auxiliares. Se piensa que en un futuro cuando se perfeccionen los programas de inteligencia artificial para el uso de lenguaje natural, estos puedan ser de ayuda, aunque podrían crear estereotipos.

4- Habilidades motoras. Es la habilidad de ejecutar movimientos físicos con alguna precisión desde escribir a maquina hasta el realizar una operación quirúrgica. Aquí la computadora puede contribuir en varios planos: para explicar los pasos o serie de movimientos se puede realizar con el modo tutorial, para realizar algunos ejercicios de coordinación motora con las manos, el teclado o ratón se puede mediante la modalidad de ejercitación y práctica, pero incluso en situaciones más complejas se puede hacer uso de simulación y juegos.

Actualmente con la existencia de robots y manipuladores controlados por computadora es posible adquirir algunas habilidades. Un ejemplo sofisticado de esto son los simuladores espaciales o los entrenadores de vuelo.

5- Actitudes. Las actitudes están implícitas en cualquier otro tipo de aprendizaje. Se refieren a la predisposición interna de las personas de responder positiva o negativamente ante una situación. Es una reacción emocional asociada o influenciada a la forma en como son aprendidas otras cosas. Es un poco la conciencia del aprendizaje, que a su vez es captable o modificable (como dirían los conductistas).

Según Gagné los cambios en las actitudes se pueden realizar mediante el acondicionamiento, el reforzamiento y la modelación del comportamiento humano. Merrill señala que la motivación inicial, la retroalimentación positiva, el control del aprendizaje y la adaptación a cada persona de la lección computadorizada pueden ayudar a tener una mejor actitud respecto al AAC. El mostrar las actitudes en video y modelarlas en computadora pudiera ayudar a esto. En los juegos por computadora es evidente el fomento de actitudes.

De lo anterior se desprende que existen áreas privilegiadas del modo tutorial. Básicamente tiene que ver con mostrar algo, pero no en una demostración estática, sino en una que explique, que permita entender, clasificar y operar algo.

Dennis y Kansky⁽⁶⁾ proponen el uso de tutoriales en áreas de descubrimiento mediante el diálogo. Después de todo un tutorial es un diálogo entre la computadora y el usuario. Este diálogo puede ser acaparado por la máquina que da largas explicaciones o bien puede ser llevado de manera más ágil mediante breves explicaciones o basándose en preguntas que vayan guiando al estudiante hacia la respuesta deseada, pero sobretodo a inferir la explicación que le va a permitir clasificar.

Hay un ejemplo que presentan estos autores que permite ilustrar lo anterior. Se trata de enseñarle al estudiante que son los triángulos isósceles. Se le presentan al estudiante ejemplos y contra-ejemplos de lo que es o de lo que no es un triángulo isósceles, tanto en forma gráfica como numérica.

Posteriormente se le pregunta con algunos ejemplos que diga si es o no triángulo isósceles, en particular se le presenta una situación nueva que es la de un triángulo equilátero, pero se le deja que se equivoque para entonces darle una explicación.

Esto es válido e interesante, pero hay que tener cuidado en las actitudes que induce el hecho de equivocarse o de pensar que la máquina tiene un error.

El modo tutorial surge del ideal instruccional: un maestro para cada alumno. Muchos creen que esto sería lo más efectivo, pero el inconveniente es lo caro que resultaría y no habría maestros suficientes para ello.

Estas cuestiones han sido trabajadas mucho en la enseñanza programada, por esta razón los tutoriales tuvieron una difusión muy rápida con el advenimiento de las computadoras personales en los años setenta.

⁽⁶⁾ Referencias al final.

Entonces se tenía que producir libros de texto masivos para abrir las universidades más allá de las aulas, en estos textos tenían que orientarse a lo que se llamaría auto-aprendizaje. Sin embargo estos textos se quisieron emplear en otros contextos como el salón de clases o el taller supervisado.

De aquí, se debe de aprender también de los fracasos y limitaciones de las experiencias anteriores como la de los libros de enseñanza de auto-aprendizaje o los audiovisuales. El error principal es suponer que estos cursos son para auto-enseñanza, es decir que no necesitan al maestro, que lo sustituyen simple y llanamente.

A menos que se trate de un curso por correspondencia o de algún sistema abierto, los cursos tutoriales computarizados van a ser presentados en instalaciones escolares, y en consecuencia con un maestro. Ahora bien el maestro puede usar o no ese tipo de material, para consulta, tener referencia, complementar y sobretodo preparar por adelantado una lección, pero de ninguna manera para sustituirlo.

El antecedente de los libros de texto programados, trajo como consecuencia que se hiciera un trasplante de dichos libros a la computadora; y por desgracia se trasplantaron los menos adecuados pero más fáciles, los que se parecen a un texto común y corriente, logrando el libro electrónico. Lo anterior sería una manera simplista pero muy común, de encontrar a los tutoriales.

Se logró mucha experiencia con el rechazo y la crítica que se hizo a los tutoriales, tanto que muchos autores y compañías de material educativo computadorizado los han descartado por completo. Sin embargo esto trajo también la creación de herramientas que faciliten la escritura de los tutoriales.

Aunque los procesadores de texto, editores de pantalla y en general los programas que permiten poner en secuencia pantallas (actualmente conocidos como simuladores de proyectores de transparencias o diapositivas) pueden servir, no incluyen lo más

importante que es el diálogo y la interacción. Los primeros pasos se dieron al incluir en estos programas capacidades gráficas y de sonido, así como el poder preguntarle algo al usuario y contestarle, sin embargo eran antecedentes y herramientas.

Por esta razón se empleaban y se siguen empleando lenguajes tradicionales de programación cuyo problema era que se necesitaban de programadores. Para darle más agilidad se necesitaba que manejarán diferentes secuencias o lo que se llama estrategia ramificada y surgieron los lenguajes de autor muy rígidos.

Los lenguajes y sistemas de autor.

La idea de describir en esta parte aunque de manera breve, los lenguajes y sistemas de autor es que son la manera más fácil y la más empleada para realizar esta modalidad.

Los sistemas de autor empezaron siendo simples manejadores de lecciones, posteriormente fueron sistemas de autor de lecciones que además de poder escribir una lección, verla, editarla (o modificarla) y hacer algo de interacción simple (preguntas- respuestas), coleccionaban los datos relativos a las respuestas de los estudiantes, incluyendo en algunos casos comentarios y reacciones de los mismos.

En la actualidad los lenguajes de autor o sistemas de autor tienden a evitarle al autor la tarea de programar o al menos a simplificársela. Por esa razón un sistema de autor es ante todo un programa que genera o escribe programas de cómputo. Estos programas así generados son almacenados en forma compacta y ejecutables directamente en la computadora por el estudiante.

Los lenguajes de autor en la actualidad no son puramente tutoriales, mezclan la modalidad de ejercitación con la de tutorial, sirven para uno y otro caso. Esto es debido a que en los tutoriales no sólo se presenta material, sino que también se realizan preguntas y ejercicios, es decir,

después de haber presentado unos conceptos, aún sin haber terminado, hacen ejercicios.

Generalmente los ejercicios que se hacen son sobre casos límites de lo que se acaba de presentar para hacer pensar al estudiante y reforzar lo que acaba de aprender. No importa entonces si el estudiante se equivoca o no, es presentada la respuesta con una amplia explicación del caso que involucra la pregunta. Esto hace un poco más dinámica la presentación tutorial.

El ideal de estos lenguajes o sistemas de autor es que un maestro sin conocimiento de programación, pero experto en su materia pueda escribir y desarrollar una lección. El sistema lo debe de guiar en la construcción de la lección, pero no lo guía en el diseño (para ello necesita de una metodología).

Existen dos formas de sistemas de autor: los fijos y los flexibles.

Los fijos implican un formato fijo en cada lección y a veces en la pantalla, ayudas, tipo de respuestas (por ejemplo cierto o falso, selección múltiple, etc.), los datos del estudiante son almacenados de la misma manera o sólo permite un tipo de lecciones (tutorial, ejercitación y práctica). Los sistemas fijos son los más comunes y existen en la mayoría de las grandes computadoras y en algunas de las computadoras portátiles.

Los flexibles permiten al maestro modificar todo, obviamente son más complejos internamente pero también en su uso. Al requerir los sistemas flexibles una gran cantidad de memoria, para hacer estos cambios o adaptaciones prácticamente sólo los hay por el momento en sistemas de cómputo grandes y medianos y no son muchos.

Con el aumento de capacidad de memoria de las computadoras portátiles es de preverse que en un futuro próximo se puedan trasplantar o diseñar de estos sistemas flexibles para este tipo de equipos.

Los sistemas de autor generalmente presentan cuatro bloques:

- El editor de lecciones.
- El manejador de lecciones.
- El archivo con la lección y sus datos.
- El archivo con los datos y respuestas de los estudiantes.

El editor de lecciones es un programa que solamente puede tener acceso el maestro o autor (generalmente viene en un disco aparte o necesita de una palabra llave o "password"). Este programa le permite: crear una lección, ver o revisar una lección, editarla o modificarla, consultar, revisar o modificar los datos del estudiante.

Es el módulo de control y acceso a los demás módulos por parte del maestro. Cuando crea una lección lo que hace es crear el módulo que se ha llamado *archivo con la lección y datos*.

Cuando se revisa una lección, se tiene acceso al programa que suministra el sistema y que se ha llamado *manejador de la lección*. A través del manejador de la lección el maestro observa la lección como la vería el estudiante. Cuando el maestro revisa o modifica los datos del estudiante tiene acceso al *archivo con los datos y respuestas de los estudiantes*.

Este Archivo con los datos y respuestas de los estudiantes es creado por el manejador de lecciones y en él el maestro puede consultar, dejarle comentarios, borrarlo, hacer estadísticas, calificarlo etc.

El manejador de lecciones es un programa que forma parte del sistema. Es el programa que maneja el estudiante y a través de él tiene acceso a sus lecciones que el maestro preparó y que se encuentran en el archivo de lecciones.

El manejador de lecciones le permite entonces realizar la lección, lo que implica el establecer el diálogo con la computadora, responder, preguntar, etc.

Dado que la lección es preparada para varios estudiantes, el manejador de lecciones pide al estudiante que se identifique mediante una palabra clave secreta, así reconoce que se trata de ese estudiante y no de otro.

Entonces el manejador de lecciones crea o puede tener acceso al archivo con datos y respuestas del estudiante, en donde va almacenando las respuestas o las evaluaciones que se hayan hecho durante la lección, para que el maestro las examine.

Hay que notar que con esta estrategia las lecciones tutoriales quedan siempre bajo control y supervisión de un maestro. Este módulo es el más difícil ya que debe proveer la retroalimentación al estudiante, el poder de decisión de lo que conviene presentarle a continuación directamente o para que escoja el estudiante.

Planeación de una lección computarizada.

Lo que se va a mencionar en este apartado de planeación es válido no sólo para una lección tutorial, sino para cualquier otra modalidad de lección computarizada de AAC.

Para poder diseñar una lección computarizada es necesario entender que tal tipo de enfoque es más difícil que el tradicional (de escribir un libro de texto) y más costoso por los recursos que lleva involucrados por el diseño versátil que presenta.

Para poder realizarla en computadora de manera efectiva, hay que seguir un plan que permita avanzar con claridad por lo cual se mencionan los siguientes puntos:

- Saber que se va a hacer.
- Cuales son mis recursos.
- Que etapas se van a realizar.
- A quien va dirigido.
- En cuanto tiempo se va a hacer.
- Con que instrumentos o lenguaje se va a realizar.

El plan debe de contener la metodología con que se va a realizar para que este instrumento sea efectivo.

El Objetivo.

Para realizar un tutorial como primer punto se debe de tener muy claro que es lo que se quiere enseñar, que es lo que se quiere aprender. Una vez que se ha fijado esto, se identifica el objetivo de la lección, es decir, un enunciado muy rápido que sintetice qué es lo que se va a enseñar, a quien va a ser enseñado, el tipo de modalidad de enseñanza y su porqué. Es decir, la concepción del conocimiento o habilidades y se hace explícito cuál va a ser la estrategia de enseñanza.

El objetivo se visualiza dentro de una unidad de enseñanza - aprendizaje, pero no son suficientes para escribir la lección, por lo que hay que descender a un nivel de detalle más grande. Por esta razón es necesario descomponer el objetivo en sub-objetivos de tal manera que estos sean trasladables directamente a una lección.

Es decir, se pregunta uno cómo hacer para alcanzar el objetivo, qué es lo que se necesita saber, que orden debe de llevar, que ejemplos o casos límites existen, etc. Se definen entonces los marcos y se escriben. Finalmente el objetivo debe de tener explícito de alguna manera la forma de como se va a evaluar el material, resultado del proyecto.

El auditorio o usuarios.

Un punto muy importante es el definir el público o auditorio al cual está dirigido este curso en particular. Lo anterior significa el conocimiento del tipo y características del estudiante, como las siguientes:

Los antecedentes académicos, en términos de sus conocimientos y habilidades previas ("pre-requisitos").

El lenguaje se debe de emplear con el estudiante, si se puede hacer referencia o no a algo supuestamente conocido.

El nivel del estudiante, es decir la madurez del estudiante, pero sobre todo su capacidad y rapidez de asimilación, abstracción y comprensión de conceptos.

El entrenamiento previo en este tipo de cursos computarizados.

El interés del estudiante por este curso, su motivación.

La finalidad de la lección, lo que significa saber si ha tenido un contacto previo con el material de la lección.

El tipo de uso de la lección por parte del estudiante. Si la lección es de aprendizaje, o sólo de reforzamiento, si es complementaria a un curso tradicional o se presenta material nuevo que sólo va a ser presentado bajo esta manera.

Es claro que el usuario de este tipo de cursos debe de estar familiarizado con la computadora, sus teclas, cómo prender y apagar la computadora, cargar un paquete en la memoria y eventualmente hacer respaldos.

Sin embargo, se debe siempre de suponer que el estudiante no es un programador, sino sólo un usuario que sabe como interaccionar con la computadora.

El tiempo.

Para desarrollar un proyecto cualquiera de programación, es necesario saber el marco temporal en el cual está encuadrado el proyecto. Lo que implica un conocimiento del tiempo disponible en dos sentidos:

Primero en saber de cuanto tiempo se dispone para realizar el diseño y programación de la lección.

Segundo el tiempo que dispondrá el estudiante o en el cual deba de realizarse la presentación y aprendizaje del material, impuesto por factores externos.

Lo anterior puede llevar a decisiones como la imposibilidad de lograrlo de manera adecuada en el

tiempo, evitar el relacionar el material con otros materiales, limitar los ejemplos, reducir o ampliar el tema en cuestión, determinar un poco el número de pantallas que se pueden disponer en la lección, etc., ésta es una decisión muy importante.

Basándose en una pantalla típica, es decir la cantidad de información que va a ser presentada simultáneamente, se debe de experimentar con usuarios típicos para observar cuanto tiempo les toma el absorber el material presentado en una pantalla y cuanto tiempo les toma el responder las preguntas.

Así por ejemplo si se dispone de 15 minutos por lección y la pantalla típica es leída y contestada en un promedio de 3 minutos, es claro que cuando mucho, la lección contendrá sólo 5 pantallas, por lo tanto cuando mucho 5 marcos. Habrá que preguntarse si es esto posible.

El tiempo que se dispone para realizar un proyecto debe de ser repartido en un calendario, donde además de las etapas propiamente del desarrollo, hay que incluirle el tiempo dedicado a la negociación, generalmente desarrollando y mostrando el prototipo algunos autores señalan que esto no debería de constituir más del 5% del tiempo y recursos, pero la experiencia señala que es mucho mayor tal tiempo y que además, no importa cuanto se gaste en esta etapa, es importante aclarar lo que se va a desarrollar y las expectativas. Finalmente no hay que olvidar, las etapas de pruebas, corrección y documentación.

Recursos.

Hasta que se tiene definido el tiempo y su calendario, no es posible pensar en los recursos que se necesitan para desarrollar un proyecto. Algunas partes del proyecto pueden ser aceleradas si se contratan servicios externos o se recluta más personal, con su consecuente costo, sin embargo, hay etapas que no pueden saltarse o hacerse simultáneamente, por más dinero que se gaste.

Es conveniente en consecuencia emplear para esta parte de la planeación de una lección computarizada sea tutorial o no, que se haga un diagrama de tareas a realizar y se encadenen éstas bajo la metodología de ruta crítica.

Mediante la ruta crítica se puede observar que se puede hacer simultáneamente y que no, hasta donde hay holguras en el tiempo de realización programado y en donde es crítico cualquier atraso en el proyecto. Puede ser muy útil el emplear en esta parte de la planeación un paquete computarizado de ruta crítica.

Una cosa es la estimación de los recursos necesarios: equipo, personal y dinero y otra es el saber los recursos disponibles. Este punto va desde conocer las computadoras en las que va a ser realizado, en las que se va a utilizar, hasta los recursos de programación, el equipo humano que trabajará en el diseño y las facilidades externas en que se va a desarrollar.

Esto también incluye si se van a utilizar o se puede utilizar otros dispositivos como proyectores de diapositivas, video cámaras, video en discos compactos, etc.

En todos los cálculos de programación siempre se deja un margen, para imprevistos resultante de cualquier eventualidad: se enfermó alguien del grupo de trabajo o renunció, se descompuso un equipo, etc.

Selección de instrumentos y lenguaje.

La programación de una lección computarizada puede ser realizada en cualquier lenguaje de programación Basic, Pascal, etc. La selección del lenguaje o instrumento en el que va a ser escrita la lección tiene repercusiones muy importantes en cuanto al tiempo de desarrollo.

Lo anterior es debido a las posibilidades técnicas, a las facilidades de mantenimiento, al tipo de personal, sus capacidades técnicas, etc., en fin todo en cuanto a su costo. La metodología de desarrollo es independiente del lenguaje de programación que se escoja: Basic, Pascal,

Fortran, Cobol, etc. o del paquete o lenguaje de autor con el que se trabaje. Es bien sabido que mientras más facilidades presente un lenguaje o paquete, más fácil será el realizar un material AAC.

Sin embargo, la decisión de en qué lenguaje se va a programar depende menos de cuál lenguaje es mejor y más de las pretensiones de uso y las limitaciones como: que tipos de máquina se dispone o si se piensa generalizar, que compiladores hay disponibles, etc.

Curso, lecciones, marcos y unidades

Un curso se compone de lecciones sobre un tema, así por ejemplo un curso de matemáticas cualquiera, puede tener como lección el aprender las fracciones, las proporciones, la regla de tres, etc. Cada uno de estos temas forma una lección, cada lección es un tema aparte. Como ya se vio, es factible descomponer una lección en unidades o módulos de aprendizaje, que a su vez se descomponen en marcos conceptuales y de evaluación y estos a su vez eventualmente en pantallas, que es lo que se verán reflejado en el monitor de la computadora.

Una lección se presenta como una unidad que dice todo acerca de un tema en particular, claro hasta cierto nivel de profundidad. Por ejemplo, si la lección es sobre la computadora, se presentará qué es y para qué sirve una computadora sus partes externas e internas y finalmente la necesidad de programas para hacer funcionar las computadoras. Después de una presentación de texto, eventualmente ayudado con gráficas y dibujos, se realiza una serie de preguntas, se corrigen las respuestas incorrectas y después se califica; si la calificación es superior a un cierto valor se declara que asimiló la unidad y pasa a la siguiente, si no, se repite la lección o parte de ella.

Los marcos conceptuales permiten identificar un tema en concreto, pero antes de ver cómo está por dentro el marco, tiene uno que encontrar una estrategia de secuencia de presentación. Es decir, de qué manera conviene que el marco se presente, antes de que y

después de cuales otros. Posteriormente se debe de analizar si se puede descomponer en actividades elementales o unidades de aprendizaje y es entonces cuando se escribe entonces el marco.

Una vez conocidos los marcos y con el objetivo en mente, es posible saber en qué puntos hacer más énfasis y repetir o reforzar el conocimiento y en que otros puntos poder pasar de largo, esto necesita del valioso conocimiento de un maestro que haya enseñado varias veces y deseablemente en diferentes ambientes el curso en el cual está insertada la lección.

Toda lección conlleva un objetivo grande de aprendizaje: el aprender a sumar, el aprender a jugar damas, el aprender a cocinar, etc. Pero generalmente cada aprendizaje de estos supone el aprendizaje y dominio de un conjunto de etapas bien definidas, que a su vez pueden requerir del conocimiento de pequeños trucos, habilidades y conocimientos, que son las unidades o módulos de aprendizaje.

Cada una de estas representa un pequeño desafío: por ejemplo en la suma aritmética de dos números reales. Los marcos podrían ser el sumar la parte entera, otro sumar la parte decimal y finalmente el manejo del punto decimal en la suma.

Cada uno de estos requiere, el saber sumar los dígitos que van del 0 al 10, para posteriormente sumar números de un dígito que rebasen 10, para después seguir con los de dos dígitos y saber llevar uno a la siguiente posición etc. Se descompone el gran objetivo de aprender a sumar en sub-objetivos, que van a formar los módulos o unidades de aprendizaje.

Para encontrar estos módulos se puede recurrir a organizar los sub-objetivos o metas a lograr para aprender el gran objetivo en su totalidad. Esta organización surge, porque así se descompone naturalmente el problema por su propia naturaleza (etapas naturales) como sería en el aprender a cocinar hay que aprender a cocinar primero (hay una división

natural), pero en otros objetivos o lecciones, la división tiene que ser artificial.

La división artificial es dada en términos de las dificultades en el aprendizaje (división pedagógica), como en el caso de la suma en que se van aumentando el tipo de suma y el número de dígitos, después el punto decimal y así sucesivamente hasta dominar todo el tema de la suma.

Por ejemplo en el caso del aprendizaje del juego de Damas: conviene en dividirlo en el aprendizaje del tablero, de las fichas, el aprendizaje del movimiento de las fichas, el aprendizaje del comer fichas, el aprendizaje del coronamiento de una ficha y sus movimientos, y el aprendizaje de cuando se gana o empata ("tablas") el juego, los anteriores serían los marcos (que como se puede ver algunos ya no conviene dividirlos); sin embargo el aprendizaje de algunas estrategias para llevar un juego ganador, podría ser un módulo.

Cuando sea posible, es conveniente organizar directamente los sub-objetivos de manera conjunta ya que para aprender una meta hay que saber otras.

En otros casos la estructura jerárquica no existe, se repiten los sub-objetivos o son estos casi independientes unos de otros, por lo que habrá que pensar cuál puede ser su secuencia o serie, ya que sólo se puede (y así conviene) presentar un sub-objetivo a la vez.

Metodología.

La metodología que se propone aquí tiene en cuenta las experiencias de la llamada "instrucción programada" y las de la "instrucción asistida por computadora". Éstas no forman una ciencia, pero si dieron la experiencia que permitió la sistematización de experiencias. Esta sistematización es un esbozo de metodología, que presentada aquí da una guía valiosa sobretodo a quien comienza en este difícil arte del diseño de cursos computarizados.

La metodología presupone que no hay que comenzar a programar nada, sino hasta que se tiene resuelto el qué, el porqué y el cómo se va a realizar la lección en computadora, planeado desde el papel, hasta los más mínimos detalles. Esto es muy importante para evitar el penoso esfuerzo de reprogramar, simplemente porque se cambió de parecer en el camino, por falta de planeación.

Gagné propone que se incluyan en toda lección tutorial los eventos instruccionales siguientes:

- Motivar y ganar la atención.
- Presentar los objetivos.
- Recordar los pre-requisitos.
- Presentar los estímulos: Definiciones, ejemplos, contra-ejemplos.
- Dar una Guía en el aprendizaje: sugerencias, consideraciones, ayudas y sobretodo las preguntas o problemas.

Dar una retroalimentación inmediata y hacer el análisis de la respuesta, lo que conlleva la determinación de los siguientes estímulos o secuencia a presentar, llevar al material que de respuesta o presentar más ejemplos etc.

Evaluación del desempeño del estudiante, respecto a los objetivos de la lección, generalmente haciendo pruebas, almacenándolas y resumiéndolas para su uso posterior.

Facilitar la retención y la transferencia, es decir hacer revisión y práctica de lo ya adquirido y proveer ejemplos que permitan hilar unos conocimientos con otros.

Otro supuesto importante de la metodología es el diseñar una presentación uniforme para todos los marcos y pantallas, un estilo que las identifique. Tal *uniformidad de presentación* no debe confundirse con una uniformidad o monotonía de los recursos puestos en juego del material computadorizado.

Es muy fácil caer en este tipo de cursos donde se llega al aburrimiento, la monotonía y en consecuencia con la desmotivación, falta de interés y finalmente fracaso de los estudiantes. Hay que variar la forma de presentación del material, hacerlo atractivo en todo momento empleando

para ello los más variados y sofisticados recursos que pone hoy en nuestras manos la computación como: sonidos, gráficas, colores, animación, control de otros dispositivos externos como proyector de diapositivas, grabadoras, etc., sin por ello perder una imagen "de marca" y una identificación rápida en el mismo lugar de la pantalla de las ayudas, es decir que no esté buscando el estudiante donde tiene las ayudas, controles del programa, la información etc.

El cómo podría quedar una pantalla, como ya se menciona depende de la sensibilidad del autor, pero cabe mencionar que se sugieren los siguientes puntos para la elaboración de la misma:

- Día, hora, curso, lección, marco, página
- Barra de menú de opciones
- Título
- Texto con explicación
- Ventana principal
- Ventana secundaria,
- Hipertexto
- Ilustración o esquema
- Ejemplo
- Contraejemplo
- Pregunta, lugar para la respuesta

El Hipertexto serviría básicamente para dar una explicación extra sobre el funcionamiento (ayuda), algún significado y podría ser manejado como una ventana llamada a la pantalla por alguna palabra del texto subrayada o por el menú.

Un menú típico podría ser el indicar: Ayuda, deshacer, regresa a la pantalla anterior, avanza a la siguiente pantalla, salta a escoger la lección, regresa al menú principal, imprime lo que se ve en la pantalla, etc.

Es claro que no siempre va a haber necesidad de una ilustración en la pantalla, tampoco por el hecho de haber figuras, la presentación es o no monótona o mejor, sin embargo, los gráficos dicen más de mil palabras. Las preguntas pueden aparecer en la parte media de la pantalla, o dejarlas para otra pantalla.

También se pueden hacer preguntas sobre excepciones o cosas no totalmente explicadas, para que haya el factor sorpresa y el hecho de equivocarse atrae aún más la atención que el siempre contestar bien. Las preguntas pueden ser directas si se pregunta sobre lo que se dijo tal cual, pero son mejores las indirectas que hacen pensar en los conceptos de la clasificación.

Si no se quiere pedir esfuerzo a la memoria de las personas las preguntas de selección, de cuántos elementos, de clasificarlos o el ver su pertenencia o no a una lista es suficiente, pero si se quiere además que el sujeto memorice algo de respuesta, se deja el espacio en blanco para la respuesta que se confronta con la solución.

La otra parte de la metodología es la descomposición que se mencionó eventualmente en módulos y marcos. Esta descomposición debe de tener criterios uniformes. Además conviene luego el arreglar y ordenar esas partes según una estrategia como el ir de lo general a lo particular, o de lo más fácil a lo más difícil, analizando o descomponiendo en partes el problema a ser enseñado o aprendido.

La redacción se hace insertando los marcos de criterio entre el texto y dando las opciones que corresponda. Se hace una simulación de cómo se vería la secuencia o secuencias y se preparan las pantallas, Merrill señala que según investigaciones realizadas, es mejor que en la redacción de la explicación se junten las definiciones, si es que las hay, en vez de darlas independientemente. Esto permite relacionar o coordinar los conceptos en el momento de la presentación y no como un esfuerzo posterior que quién sabe si vaya a dar el estudiante.

Una vez realizado lo anterior, si va a tomar la estrategia ramificada, (a veces llamada adaptativa, debido a que la secuencia no es la misma para todos los estudiantes), realícela.

Hasta este momento, no es conveniente preocuparse por el control del sistema, pero recuerde que a mayor control es casi seguro una mayor satisfacción para el usuario,

aunque también más trabajo y complejidad en la programación. Finalmente, de nada sirve que tenga control y el sistema sea adaptativo sino está bien estructurado y planteada la lección.

Los dibujos o gráficas es lo último que se hace en la pantalla, desgraciadamente muchos programadores es lo primero que hacen. Dado que hay texto computadorizado se trata de hacer el manejo lo más fácil posible, es decir, evita el tener que hacer un manual sobre el uso, y si necesitan algunas indicaciones trate de darlas en el curso mismo.



Capítulo IV

Desarrollo del sistema tutorial.

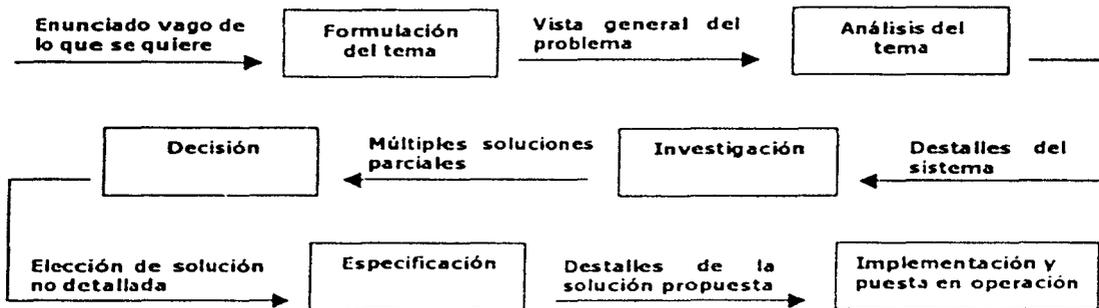
Aspectos generales.

En este capítulo se presentan los planteamientos con los que se llevo a cabo el desarrollo de este Sistema Tutorial; en el capítulo tres se presentaron una serie de parámetros que se toman en cuenta para la elaboración de un programa en esta modalidad, ahora se profundizará más y se hará mención de otros puntos de vista para la elaboración del mismo, en los que también tratamos de guiarnos para la elaboración de este trabajo.

Hay consideraciones que no aparecen en este capítulo, la razón no fue por que tuviesen menor importancia, simplemente no se emplearon en la elaboración de este sistema por que así se consideró, el por qué algunas se mencionan y otras no es la siguiente; como ya se mencionó la sensibilidad y la visión son aspectos muy independientes del autor, por lo cual cualquier otra persona al revisar este trabajo puede optar por las demás consideraciones y desechar otras tantas que aquí se presenten.

Planeación del desarrollo del sistema.

Ésta es la planeación con la cual se decidió llevar acabo el desarrollo de este sistema, como es bien sabido va de lo particular a lo general, una forma de ejemplificar esto es la siguiente:



Tomando al esquema como antecedente ahora daremos inicio de lleno al desarrollo de este Sistema Tutorial.

Desarrollo de marcos.

Para organizar los puntos o temas a tratar en una lección de sistema tutorial, se ha desarrollado el concepto de Marco, cuando no se explique otra cosa se supondrá bajo Marcos que se trata de Marcos de Aprendizaje y no de los Marcos Evaluatorios (o de criterio).

La palabra Marco, proviene de la Instrucción o Enseñanza Programada y concretamente de las primeras máquinas de enseñar. En tales máquinas se presentaba visualmente (gráficos, texto, números etc.), dentro de un marco, todos los conceptos alrededor de un punto, o un paso a aprender. Tales marcos correspondían a las ventanas de las máquinas de enseñar, o explicado de un modo más sencillo a lo que cabe en una pantalla del monitor de la computadora y es presentado o exhibido al mismo tiempo. Sin embargo, tal enfoque en pantallas es demasiado ligado al "hardware" con sus posibilidades técnicas de visualización y no a conceptos pedagógicos, por lo que se optó por una concepción más pedagógica, independiente de la máquina.

El concepto de marco tiene en la Enseñanza Programada dos acepciones por un lado la de dar un marco conceptual, es decir, todo el conjunto de ideas acerca de un concepto que se quiere enseñar o bien el de marco o recuadro de lo que se visualiza en una pantalla de computadora en un momento dado. Algunos autores mezclan estas dos concepciones, pero es conveniente el separarlas. Aquí llamaremos de manera general, Marcos únicamente a la parte conceptual y la parte visual se le llamará Pantalla, o si el recuadro es más chico que la pantalla se le llamará Ventana.

Aunque es deseable presentar un marco en una sola imagen en una pantalla de la computadora no siempre es posible. En buena medida lo anterior depende de que el marco corresponda a un conocimiento muy fragmentado, en cuyo caso si se puede, o si el marco corresponde a un conocimiento extendido en cuyo caso difícilmente cabe en una sola pantalla.

Por otra parte, las pantallas de los monitores varían de capacidad de presentación según la marca, tipo y modelo, no siempre es posible ni deseable presentar en una sola pantalla todo lo relacionado con un tópico. Esto es muy obvio, si

además de texto se piensa en demostrar o ilustrar con dibujos el tema, o incluirle movimiento, animación u otras opciones, menos va a caber en una pantalla.

Vamos a colocarnos en primera estancia dentro de una esquema tutorial que es muy empleado en el entrenamiento técnico.

En estos (Tutoriales para entrenamiento técnico) el formato de presentación incluye, por ejemplo:

- El título.
- La explicación.
- Un ejemplo.
- Pregunta.
- Retroalimentación.

En algunos casos la pantalla y el marco coincidirán pero en otros no.

En el Aprendizaje y la Enseñanza Asistida por Computadora se tiene la misma conceptualización de Marco, que en la enseñanza programada, un concepto o habilidad "puntual" (es decir no se puede dividir en otras) a ser enseñada. Se rebasa también la concepción normal de identificar un marco con una pregunta que formula el maestro con su correspondiente espacio para ser llenado por el estudiante.

Se llama marco, al concepto mínimo enseñable porque precisamente se acostumbraba enmarcar todo el concepto que se quiere enseñar junto con sus insumos conceptuales referentes y sus ángulos o puntos de vista diferentes, algunos de los cuales son los reactivos o preguntas que se van a formular.

El concepto de marco de aprendizaje, es el de una unidad mínima de aprendizaje que tiene sentido en sí misma, que ya no conviene dividirla pedagógicamente, aunque conceptualmente se pudiera hacer. Hemos hablado aquí de analizar o desmenuzar el contenido del conocimiento o

habilidad a enseñar, por ejemplo empleando el análisis de tareas. La pregunta aquí sería hasta donde conviene seguir desmenuzando y si conviene posteriormente reagruparlos.

El análisis o división se hace hasta tener conceptos simples o habilidades primarias a enseñar, sin embargo es posible el reagruparlos. Esto se hace en dos movimientos: uno alrededor de conceptos o de metas concretas y simples, a lograr en el aprendizaje simple y otra alrededor de objetivos que responden o engloban a un tema dentro de una área del conocimiento o habilidad.

A los primeros agrupamientos se les llaman módulos, mientras que a los segundos se les llamará lecciones. Este tipo de sistemas están compuestos de lecciones, las lecciones a su vez de módulos y estos a su vez de marcos y cada marco puede presentarse en una o varias pantallas. Aclaremos que no hay divisiones absolutas y éstas son relativas a los aspectos pedagógicos, de organización y otros.

Así por ejemplo en una lección de enseñanza de una correlación, un módulo podría ser el obtener el factor de compresibilidad. Es claro que hay etapas o actividades concretas para obtener el resultado de una correlación, como: el saber el valor de la temperatura y presión pseudo crítica, encontrar los valores de temperatura y presión pseudo reducidas y así encontrar el valor del factor de compresibilidad. El cálculo de estas temperaturas y presiones podría ameritar si no un curso al menos una lección, esta lección puede descomponerse en dos módulos una para condiciones pseudo críticas y otra para condiciones pseudo reducidas.

Dentro de este último módulo hay tareas concretas como el obtener condiciones pseudo críticas para distintos tipos de gas (superficiales y húmedos) que entonces puede convertirse en un marco de aprendizaje. Sin embargo, si los estudiantes desconocen el cómo obtener los resultados a estas condiciones debido al tipo de gas, entonces habrá que descomponer y proponer marcos más elementales para estos conceptos.

Existen, muchos conocimientos que son cursos compuestos por muchas lecciones, por ejemplo, el manejo de fracciones

aritméticas, que implica las cuatro operaciones aritméticas, además del significado de fracciones, y el cambio de fracciones a decimales es todo un curso compuesto por muchas lecciones.

Hasta ahora se ha hablado únicamente de los Marcos de Aprendizaje, los conceptos que permiten evaluar (si se aprendió algo o no) se pueden agrupar en lo que se conoce como Marcos de Evaluación.

Los autores experimentados recomiendan en términos generales después de concebir los marcos de aprendizaje y su orden, el escribir primero el contenido de las pruebas o marcos de evaluación. Hasta que estos últimos estén completos, se escribirán entonces los marcos de aprendizaje.

La razón para hacer lo anterior reside en que, de esta manera la redacción de los módulos de una lección están orientados a que el estudiante aprenda en una primera instancia aquello estrictamente necesario para resolver los exámenes que se le van a presentar. Además los exámenes son el primer punto de confrontación de una lección, para saber si enseñó lo que pretende o no, y si son suficientes para el estudiante.

Ahora dentro del aprendizaje asistido por computadora se puede expresar mejor con el concepto de marco las dos estrategias antes señaladas:

- La estrategia lineal, es decir, la secuencia de marcos uno después de otro.
- La estrategia arborescente en la que en algunos casos la secuencia condicionada, es decir, un salto a tal o cual página y en este caso el salto a otro marco o imagen que aparece en el monitor de la computadora.

Para hacer el salto se necesita una instrucción que permite indicar que se quiere realizar un salto bajo ciertas circunstancias y una dirección a dónde se quiere ir, a esta dirección se le conoce con el nombre de etiqueta.

El análisis de tareas es una manera de encontrar los marcos, pero posteriormente hay que formularlos, escribirlos, especificarlos.

Desarrollo de pantallas.

El desarrollo de las pantallas es la característica principal para juzgar la calidad de sistema de este tipo, dado que se trata de conjugar textos y gráficas dentro de un formato de presentación estándar; se requiere de gran sensibilidad para diseñar las pantallas, ya que al solamente vaciar el contenido de un marco en una pantalla, sin tomar en cuenta aspectos pedagógicos y artísticos para hacer de la pantalla algo atractivo que permita una comunicación fácil con el usuario, se vera reflejado en el aburrimiento del mismo.

Si no se cuenta con esta sensibilidad es bueno pedir cierta ayuda, de lo contrario más vale hacer diseños relativamente sencillos que intentar hacer cosas complicadas, el desarrollo es conveniente realizarlo de inicio en papel para después llevarlo a cabo en la pantalla.

Existen diversas herramientas que ayudan a la realización de las pantallas: los programas de diseño gráfico, los procesadores de texto, los correctores ortográficos, los programas de sonido y animación, etc. Sin embargo, los llamados lenguajes de alto nivel que permiten conjugar todos los elementos anteriores son los más adecuados.

A continuación se mencionan aspectos generales que se emplearon en el desarrollo de las pantallas de este trabajo, no obstante éstas no son ninguna receta.

- Pantalla sin demasiado texto, no más de 12 líneas, rompiendo el texto en pequeños párrafos.
- Combinamos gráficas con texto, indicando claramente de qué se trata cada dibujo o gráfica o sus componentes; no hay que perder de vista el hacer el diseño primero en blanco y negro y posteriormente si así se desea a color.
- Empleamos efectos y dispositivos para llamar la atención como el color, el sonido, el parpadeo, el subrayado, etc., únicamente cuando es indispensable, ya que el abuso de éstos solamente distrae.

- Mantuvimos un formato uniforme así como su posición y significado en lo referente a los comandos y menús de selección de opciones.
- El usuario siempre podrá salir del programa en cualquier momento y hacer consultas o pedir ayuda sobre el uso de comandos.
- Al emplear ventanas conjugamos niveles jerárquicos de información en una misma pantalla.
- Tratamos de que los tonos y los colores empleados produzcan un gran contraste, más que tratar de imitar algún color o tono en especial. Esto es debido a que si el monitor no está bien sintonizado los colores no aparecen como fueron diseñados, pero el contraste en cualquier caso se mantiene.
- Distinguimos los encabezados con otro estilo de letra y tamaño, pero todos los encabezados tienen el mismo tipo y tamaño.
- No empleamos demasiados tipos de letras y tamaños diferentes ya que el usuario no distinguiría con facilidad a qué se refiere el nuevo tipo o tamaño de letra.
- Empleamos gráficos cada vez que sea posible, ya que los dibujos frecuentemente dicen más que muchas palabras, pero sobre todo permiten el comunicar ideas más rápido y fijar conceptos. Por otra parte usamos diagramas con palabras, por ejemplo: flechas, llaves, árboles, etc. que permiten el entender cómo las ideas o los conceptos están estructurados, o bien cuáles son sus relaciones, causas, secuencias o dependencias.
- Ya que las gráficas en muchos casos no son auto explicativas empleamos etiquetas para ampliar su entendimiento.
- Incluimos dentro de la pantalla cierto tipo de animación ya que la animación no solamente tiene un efecto atractivo o de llamar la atención, si no que además de manera natural introduce el concepto de secuencia o de causa y efecto en el tiempo.

Desarrollo de exámenes y ejemplos.

Frecuentemente se menosprecia la actividad de diseñar exámenes o ejemplos e incluso los conocidos como exámenes rápidos. Sin embargo disponiendo de medios para el diseño, administración y corrección de exámenes; se puede ahorrar hasta un 30% del trabajo de un maestro normalmente. Al conjunto de herramientas computadorizadas para diseñar, impartir, corregir, revisar y analizar exámenes se les conoce como Administración de exámenes asistido por computadora.

La finalidad de que se hallan llevado a cabo ejemplos y exámenes es porque cabe la posibilidad de pensar en que los estudiantes contesten los exámenes en sus terminales directamente sin tener necesidad de generar o crear papeles, a esto se le llama la Aplicación automatizada de exámenes.

En este sistema tutorial es permitido que el estudiante tome el examen en cualquier momento dentro de un cierto período y las preguntas de su prueba son seleccionadas al azar dentro del banco de datos.

En el desarrollo preliminar de este sistema tutorial, surgieron dos problemas. El primero tiene que ver con el auditorio al cual está dirigido el curso, lo que significa conocer el nivel de los futuros alumnos. El segundo problema tiene que ver con la adecuación del curso a los estudiantes en sus diferentes niveles, agrupándolos.

El primer problema se soluciona mediante indicaciones de los antecedentes mínimos requeridos, ya que no se le pregunta al estudiante sobre el contenido del curso en sí, sino sobre los conocimientos del tema.

Cuando existen encadenamientos de cursos, es posible que existan cursos tan importantes que todo alumno deba de llevarlos.

Es claro finalmente que todo curso o lección (marco o módulo) debe de ser evaluado al finalizar, para ver o medir si el estudiante ha adquirido los conocimientos o habilidades previstas. Este examen o prueba se le llama Post-test.



Capítulo V

Manual del usuario.

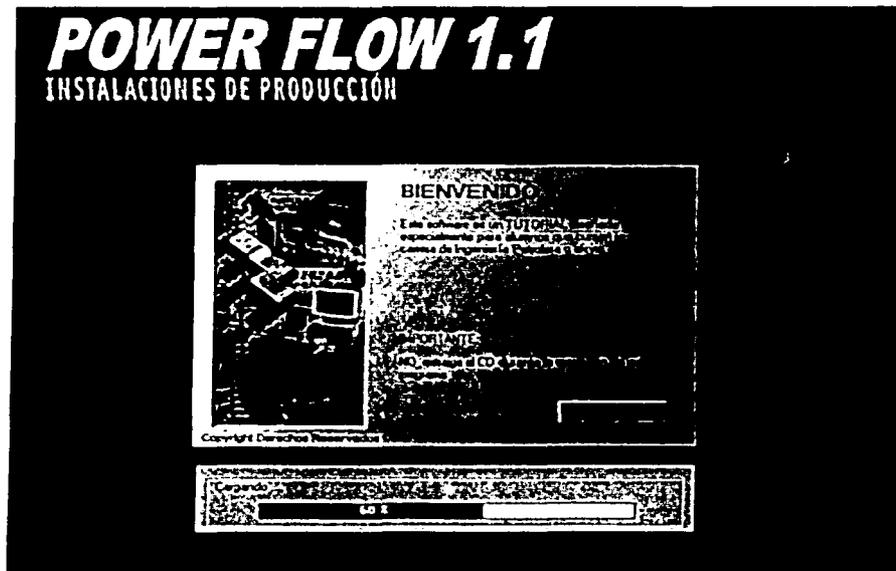
Requisitos del Sistema.

- Procesador Pentium I, 350 MHz. o superior.
- 32 Mb de memoria RAM.
- 60 Mb libres en disco duro.
- Monitor VGA o superior (Resolución del monitor 800x600)
- Lector CD ROM 32x o superior.
- Kit multimedia (tarjetas de audio y video, y bocinas)
- Windows 95 o superior.

Instalación.

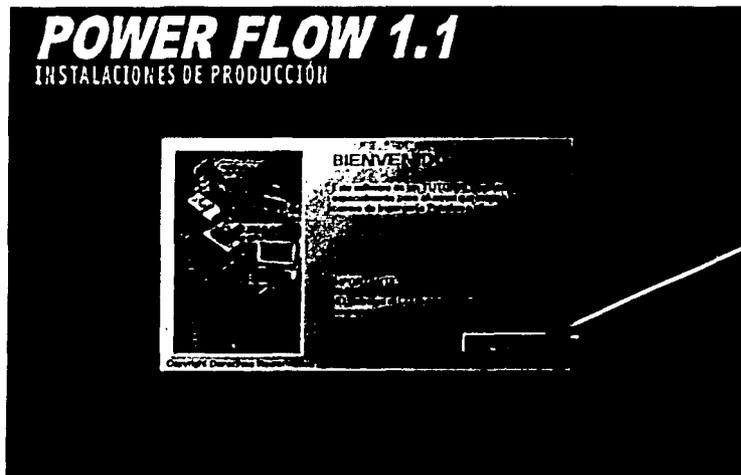
- Introduzca el CD ROM en la unidad lectora.
- Haga clic en *Inicio*.
- Seleccione ejecutar (tendrá que dar la dirección de su unidad lectora y hacer clic en el archivo Setup.exe)
- Una vez hecho lo anterior, aparecerá la pantalla donde se observa como está cargando el programa.
- Ya instalado se creará el acceso en el menú de Programas de Windows, desde donde lo podrás ejecutar.

Nota: NO extraiga el CD durante la instalación y ejecución de este programa; se recomienda no tener más aplicaciones abiertas.



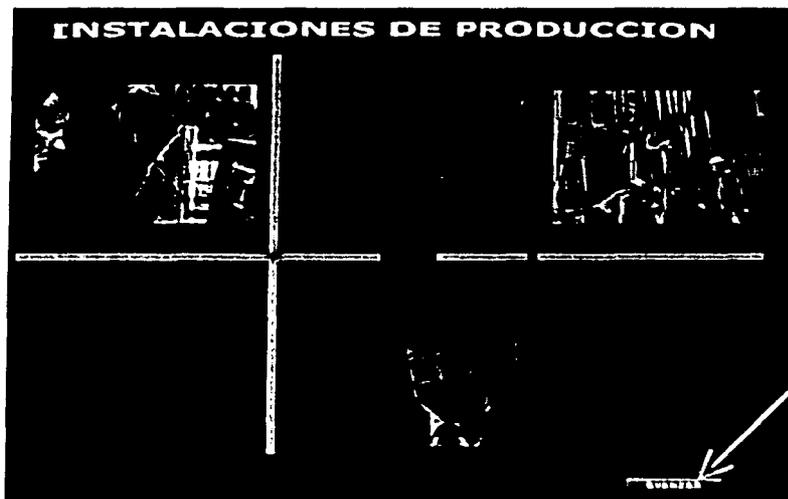
Ejecución.

Una vez que se ha cargado, hágase clic en el botón *Siguiente* para empezar ahora con la ejecución del mismo.



Haga clic aquí para continuar en Power Flow

Parte ya de la ejecución es una portada de presentación del sistema, donde tendrá que hacer clic en el botón *Avanzar*, para continuar con la ejecución de Power Flow.



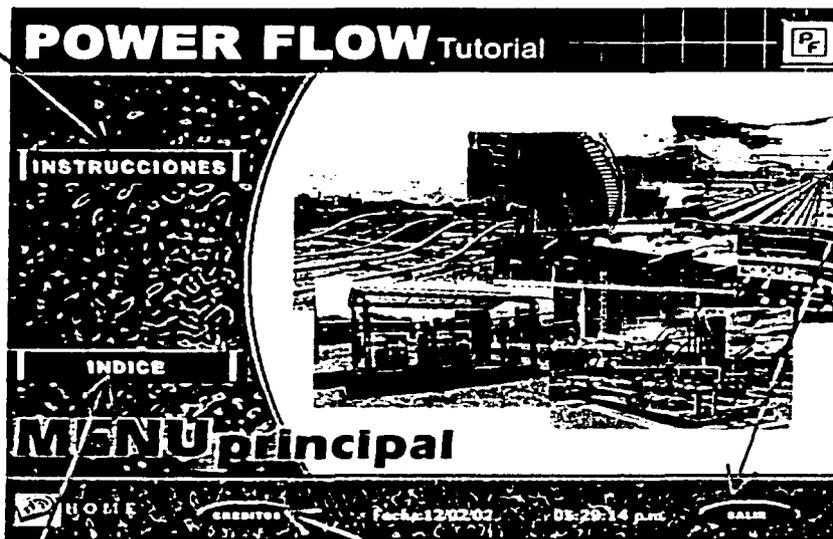
Pulse aquí para continuar en Power Flow

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En cuanto pulse el botón *Avanzar*, aparecerá la página con el *Menú Principal* de Power Flow; aquí verá botones con distintas acciones que realiza Power Flow, como: *Instrucciones*, *Índice*, *Créditos* y *Salir*.

Al hacer clic aquí se accede a las Instrucciones de Power Flow, donde se verán solucionadas tus dudas del programa, si las tienes.

Haga clic aquí para salir de Power Flow y volver a Windows.



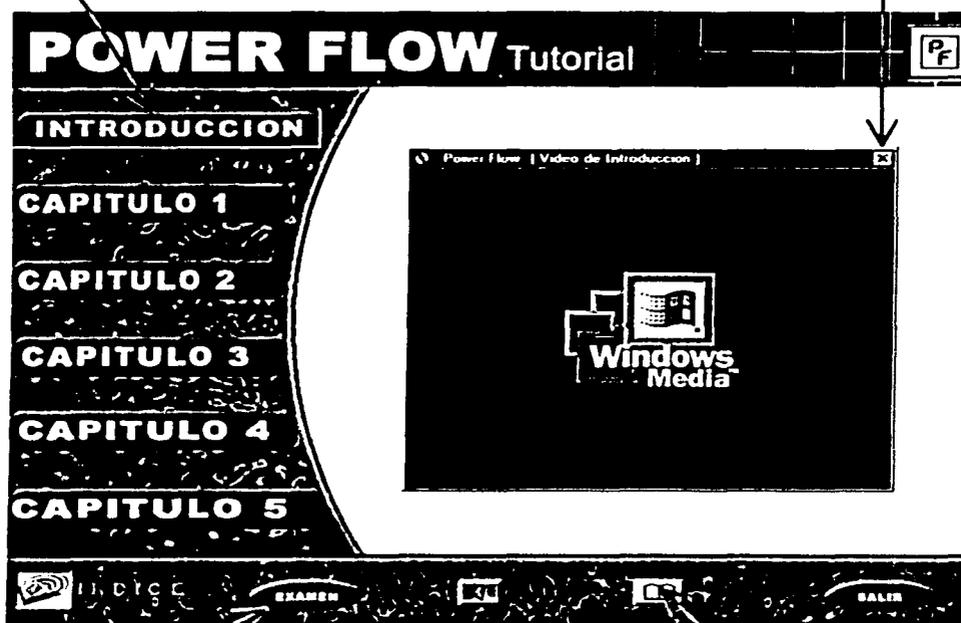
Al pulsar aquí tendrá acceso a la pantalla del Índice de temas que contiene Power Flow.

Pulse aquí para saber quien ha hecho este CD ROM.

En la pantalla donde aparece el índice de temas hay una serie de botones con las siguientes leyendas; *Introducción*, *Capítulo 1*, *Capítulo 2*, ..., *Capítulo 5*, y una serie de iconos, los cuales tienen las acciones de *Regresar*, *Examen general*, *Lista de todos los temas* y *Regreso a página principal*.

Esta opción nos llevará a un video en el que se observará lo que es Power Flow

Para salir de esta aplicación basta con hacer clic en el icono con la equis marcada para apagar el video y entonces seleccionar cualquiera de los otros temas

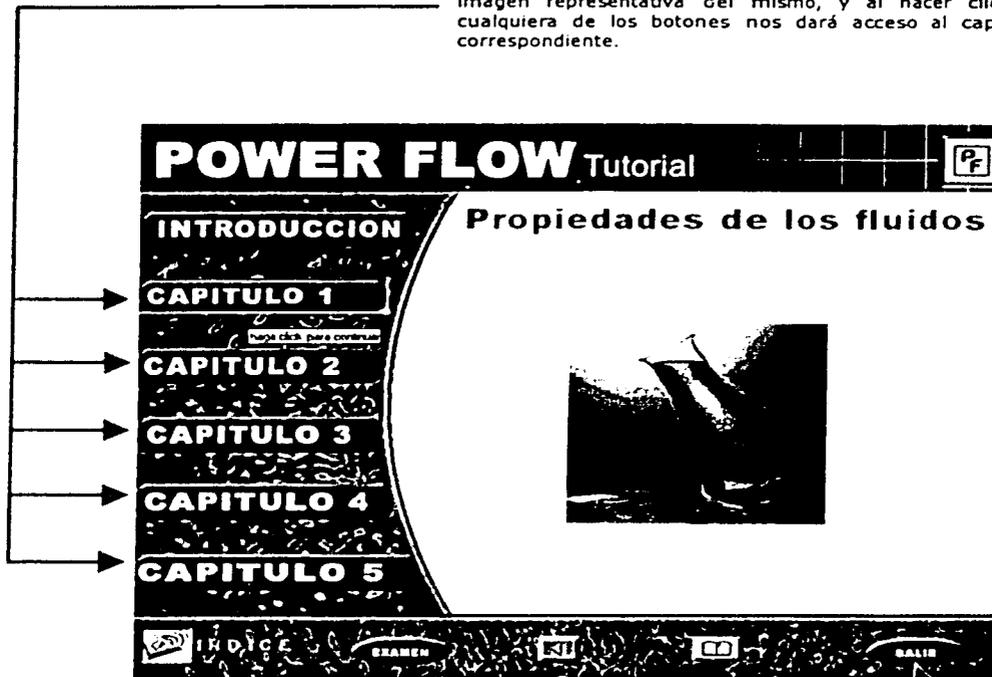


Al hacer clic aquí se accede a un examen general de los cinco capítulos contenidos en Power Flow.

Haga clic aquí para regresar a la página principal desde donde usted se encuentre.

Pulse aquí para regresar a la página inmediata anterior.

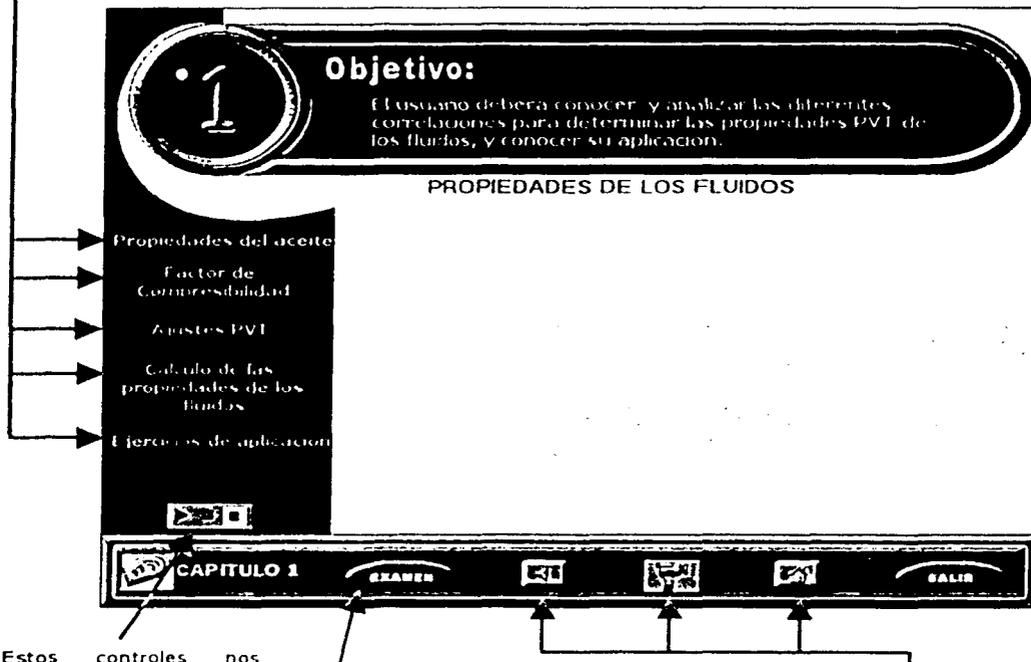
Al pasar el cursor por cualquiera de estos botones, en el área de trabajo aparecerá el título del capítulo y una imagen representativa del mismo, y al hacer clic en cualquiera de los botones nos dará acceso al capítulo correspondiente.



Haga clic aquí para salir de Power Flow y volver a Windows.

Una vez ubicados en el capítulo deseado, en este caso tomemos como capítulo deseado al Capítulo 1; en la página principal de este capítulo aparece: el título, objetivo e índice con los sub-capítulos así como una breve introducción al capítulo; Power Flow permite ver un video con la introducción del capítulo y escuchar el objetivo del mismo.

Al pasar el cursor por cualquiera de los títulos, en el área de trabajo aparecerá otro recuadro en el que podrás seleccionar un tema más específico del capítulo, y al hacer clic en cualquiera de los temas nos dará el acceso al sub-capítulo correspondiente. En este caso seleccionará del Capítulo 1, Propiedades del aceite (haga clic cuando halla cambiado de color el enunciado) este procedimiento se lleva a cabo en cualquiera de los capítulos.



Estos controles nos permitirán manipular el audio con el objetivo del capítulo, en este caso es al Capítulo 1.

Puedes ver que algunos de estos botones son iguales a los que aparecen en las páginas de Menú Principal e Índice por lo que llevan a cabo la misma instrucción al sistema. En el caso del botón con el icono de la figura de una cámara, llevará a cabo la acción de proyectar el video de introducción al capítulo, en este caso sería alusivo al Capítulo 1

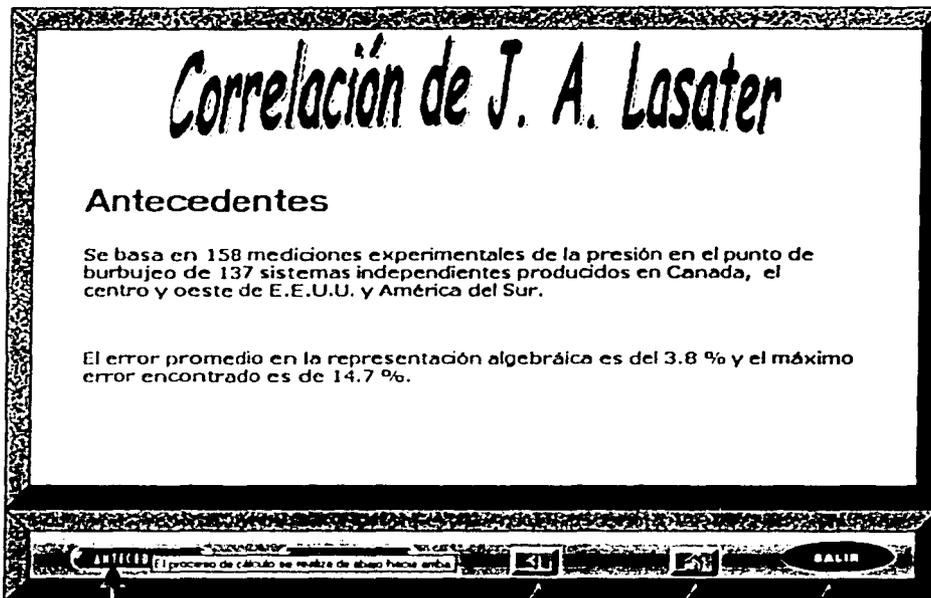
Power Flow permite hacer un monitoreo de los conocimientos adquiridos, esto lo hace por medio de un sencillo examen, solo con hacer clic aquí lo podrás llevar a cabo y así saber en que tienes aun dudas.

Al aparecer el recuadro con los temas de los sub-capítulos si es que se equivocó puede salir de él al hacer clic en la equis de la esquina o simplemente con selección de otro sub-capítulo.

The screenshot shows a software interface with a dark background. At the top left, there is a circular icon with the number '1'. To its right, the word 'Objetivo:' is displayed in a large, bold font. Below this, a paragraph of text describes the objective: 'El usuario deberá conocer y analizar las diferentes correlaciones para determinar las propiedades PVT de los fluidos y conocer su aplicación.' Below the objective, the main title 'PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS' is centered. On the left side, there is a vertical menu with the following items: 'Propiedades del aceite', 'Factor de Compresibilidad', 'Ajustes PVT', 'Cálculo de las propiedades de los fluidos', and 'Ejercicios de aplicación'. At the bottom left of this menu is a small icon. In the center-right, a sub-menu titled 'Correlaciones PVT' is open, listing four options: 'Correlación de M.B. Standing', 'Correlación de Vázquez', 'Correlación de Ostein', and 'Correlación de J.A. Lasater'. At the bottom of the interface, there is a navigation bar with several buttons: 'CAPITULO 1', 'EXAMEN', a back arrow, a forward arrow, and 'SALIR'. Arrows from the text blocks point to the 'Correlación de J.A. Lasater' option in the sub-menu and the 'EXAMEN' button in the navigation bar.

Siguiendo con el ejemplo puede ver que ya apareció otro recuadro, ahora ponga el cursor en Correlación de J. A. Lasater y al dar clic cuando halla cambiado de color, verá que le lleva a la pantalla de este tema

Puede ver que estos botones son iguales a los que aparecen en las páginas de Menú Principal e Índice por lo que llevan a cabo la misma instrucción en el sistema.



Pulsa aquí y aparece la información acerca de los antecedentes del tema, en este caso es el de la Correlación de J. A. Lasater.

Puede ver que estos botones son iguales a los que aparecen en las páginas de Menú Principal e Índice por lo que llevan a cabo la misma instrucción en el sistema (retroceder a la página inmediata, regreso a la página de Menú y salir del sistema y regresar a Windows)

Correlación de J. A. Lasater

Donde P_f es el factor de la presión en el punto de burbuqueo

$P = \frac{P_f(T + 460)}{\gamma_M}$

↑

Fracción molar del gas

↑

Procedimiento de cálculo, para obtener la presión conociendo R_s , o Y_g , el orden de cálculo se muestra en esta pantalla.

↑

O despejando R_s

↑

Fracción molar del aceite

$P_f = 504.3 \cdot 10^{-2} Y_g^3 + 310.526 \cdot 10^{-2} Y_g^2 + 136.226 \cdot 10^{-2} Y_g + 119.118 \cdot 10^{-2}$

↑

$Y_g = \frac{\frac{R_s}{379.7}}{\frac{R_s}{379.7} + \frac{350 Y_o}{M_o}}$

↑

$R_s = 132755 \frac{Y_g Y_o}{(1 - Y_g) M_o}$

↑

$Y_o = 419.545 \cdot 10^{-2} P_f^3 - 591.428 \cdot 10^{-2} P_f^2 + 334.519 \cdot 10^{-2} P_f + 169.879 \cdot 10^{-2}$

$15 \leq \text{API} < 40, \quad M_o = \frac{63.506 - \text{API}}{0.0996}$

$40 \leq \text{API} < 55, \quad M_o = \left(\frac{1048.33}{\text{API}} \right)^{1.4176}$

ANTERIORES
FORMULAS
←
→
Salir

Haciendo clic aquí se ven las fórmulas con las cuales se llevan a cabo los cálculos del tema, aquí se presentan los del ejemplo que es la Correlación de Lasater.

Puede ver que estos botones son iguales a los que aparecen en las páginas de Menú Principal e Índice por lo que llevan a cabo la misma instrucción en el sistema (retroceder a la página inmediata, regreso a la página de Menú y salir del sistema y regresar a Windows)

También, al poner el cursor sobre una imagen y si el cursor cambia de forma (de flecha a pequeña mano) querrá decir que esa imagen se puede ampliar y obtener alguna información extra.

Diagrama de Moody

d) Cuando el flujo es crítico ($2300 < N_{Re} < 3100$) el factor de fricción se puede aproximar con la siguiente expresión:

$$f = \frac{N_{Re} - 2300}{2300} \cdot \left[\frac{13521}{\left[-2 \log \left(\frac{\epsilon}{3715 \cdot d} + \frac{2.514}{\sqrt{f \cdot N_{Re}}} \right) \right]^2} \right] + 0.032$$

Los valores de f , expresados en estas últimas ecuaciones se utilizarán, junto con la ecuación de Darcy, en el cálculo de las pérdidas de presión por fricción.

Diagrama de
Moody



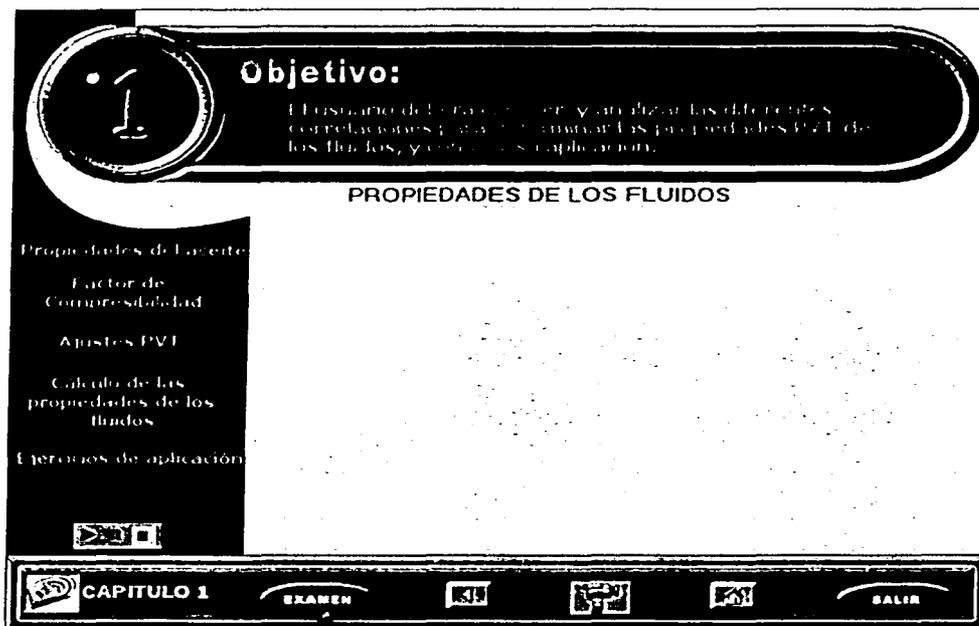
Haga click para ver en grande

Cerrar

←
FORMULAS
EXIT
OK
SALIR

Este es un ejemplo en el cual puedes observar un cambio en el cursor, el cual ampliará en este caso la gráfica que se muestra

Para aparecer en pantalla los exámenes correspondientes a los capítulos hay que hacer clic en el botón *Examen* de cada capítulo, y para el examen global es necesario ir a la página de *Índice* y hacer clic en el botón *Examen*.



Al hacer clic aquí aparecerá una pantalla con un examen en que tendrá que generar sus preguntas, y donde aparecerán las preguntas previamente almacenadas en la base de datos de Power Flow, también podrá calificar este examen y así monitorear su avance.

En cuanto se proyecte en la pantalla el examen hay que generar las preguntas y después contestarlas, si no se contestan todas las preguntas aparecerá un recuadro el cual te dará el aviso de que no fueron contestadas las preguntas en su totalidad, lo que generará un error al calificar el examen.

Examen

¿La correlación de Lasales involucra un factor de presión en el punto de saturación?

¿El factor de compresibilidad es un parámetro que nos determina la desviación que ocurre entre un gas real y el gas de trabajo?

¿Vamos a emplear 5000 datos de R_s , B_u y Viscosidad del aceite a diferentes presiones y temperaturas?

¿El uso de correlaciones para la determinación de las propiedades de los fluidos surge por la carencia de análisis PVT apropiados de laboratorio?

¿El factor de volumen se define como la relación del volumen de gas a condiciones estándar entre el volumen del gas a condiciones de yacimiento?

¿Las correlaciones empleadas para las propiedades de los fluidos nos determinan su comportamiento real en el yacimiento?

Capítulo 1

Calificación
0/0 0%

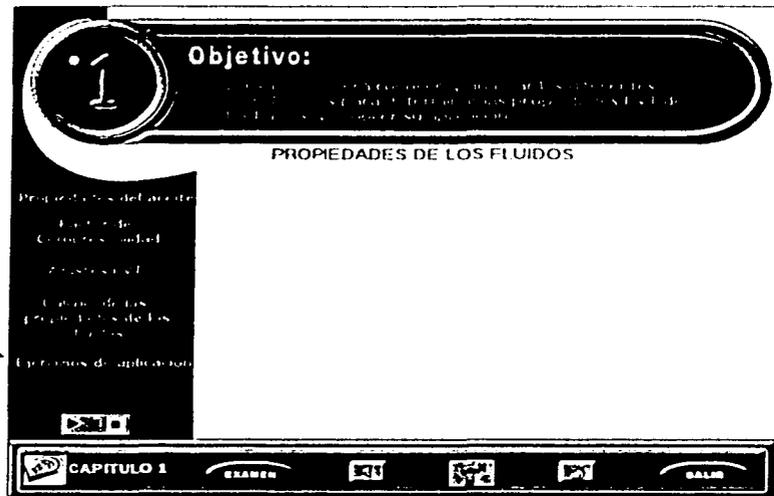
GENERAR PREGUNTAS CALIFICAR AJU PVI SALIR

Una vez contestadas TODAS las preguntas que aparecen en pantalla, pueden hacer clic en este botón, el cual tiene la función de calificar y mostrar la calificación en forma de porcentaje, así como el número de aciertos obtenidos.

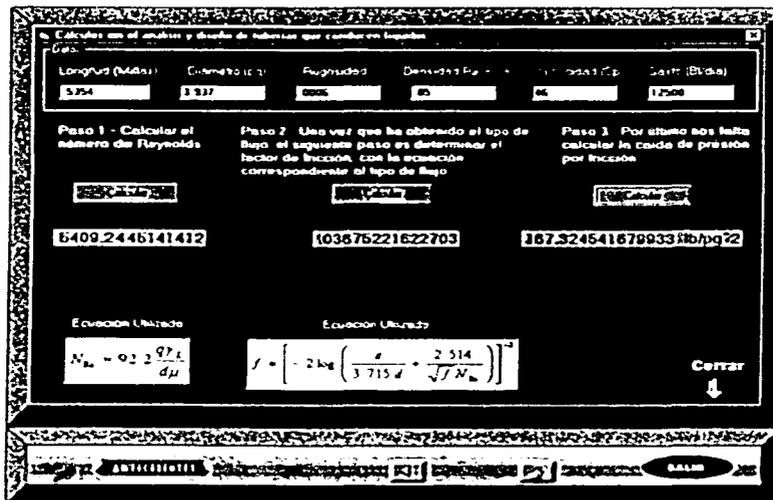
En un principio al pulsar este botón podrás generar las preguntas del examen, estas preguntas se generan en forma aleatoria, son seleccionadas de una base de datos con las que cuenta Power Flow.

Para proyectar los ejercicios en pantalla hay que ir a la página principal o de índice de cada tema, y hacer clic donde dice *Ejercicios de aplicación*.

Al hacer clic aquí Power Flow mostrará el ejercicio de aplicación, en este caso será para el Capítulo 1, lo mismo sucederá en los demás Capítulos.



Un ejemplo de este tipo de pantalla es la siguiente:



En algunas de estas pantallas hay que llevar a cabo ciertos cálculos previos; Power Flow da la opción de llevarlos a cabo, dependiendo de que es lo que se desea obtener es el tema al que tendrá que ir para realizarlos.

NOTA: Es también importante que se sepa que en algunas pantallas de Power Flow hay pequeñas leyendas donde puede leer el significado del símbolo que ves; esto pasa sólo con mantener el cursor sobre el símbolo del que desees saber su significado o si lo prefiere puede ir al final de este *Manual del Usuario* o a las INSTRUCCIONES del Sistema y en el apartado *Símbolos y Nomenclatura* podrá ver el significado de los términos empleados..

Sin más detalles que agregar damos la bienvenida a POWER FLOW esperando sea de gran ayuda.



POWER FLOW

Nomenclatura

A	Área	(pies ²)
A _p	Área de sección transversal de la tubería	(pies ²)
a ₁ , a ₂	Constantes	
BHP	Potencia al freno	(HP)
B _g	Factor de volumen del gas	(pies ³ _g @ cy / pies ³ _o @ cs)
B _o	Factor de volumen del aceite	(pies ³ _o @ cy / pies ³ _o @ cs)
B _{ob}	Factor de volumen del aceite en el punto de saturación	(pies ³ _o @ P _b / pies ³ _o @ cs)
B _w	Factor de volumen del agua	(pies ³ _w @ cy / pies ³ _w @ cs)
C _d	Coefficiente de descarga del estrangulador	
C _f	Calor específico de un fluido	(Btu / lb _m · °F)
C _o	Compresibilidad del aceite	(pg ² / lb)
C _w	Compresibilidad del agua	(pg ² / lb)
C _a	Constante de proporcionalidad	
D _i	Profundidad vertical del punto de inyección	(pies)
D _m	Longitud desarrollada al punto de inyección del gas	(pies)
D _{vi}	Profundidad vertical del punto de inyección del gas	(pies)
d	Diámetro	(pg)
d _{ci}	Diámetro interior de la T. R.	(pg)
d _E	Diámetro equivalente	(pg)
d _{ext}	Diámetro exterior	(pg)
d _{ie}	Diámetro exterior de la T. P.	(pg)
d _o	Diámetro del estrangulador	(pg)
E	Eficiencia de flujo en tubería, fracción	
E	Factor de eficiencia del orificio, fracción	
E _p	Eficiencia de compresión, fracción	
EF	Eficiencia de flujo en el yacimiento	
e	Base de los logaritmos neperianos, e = 2.7182	
exp	Base de los logaritmos neperianos, e = 2.7182	
f	Factor de fricción del diagrama de Moody	
f _n	Factor de fricción normalizado para dos fases	
f _o	Flujo fraccional del aceite	
f _{fp}	Factor de fricción para dos fases	
f _w	Flujo fraccional del agua	
g	Aceleración de la gravedad	(pies / seg ²)
HP	Potencia	(HP)
HP	Potencia de compresión	(HP)
hp	Longitud de intervalo perforado	(pies)
H, z	Elevación referida a un nivel	(pies)
II	Índice de inyectividad	(bl / día / lb / pg ²)
i	Gasto de inyección	(bl / día)
i _g	Gasto de inyección del gas	(MMpies ³ @ cs / día)
i _o	Gasto de inyección del gas en un punto de inyección	(pies ³ / seg)
k	Relación de calores específicos	
k	Permeabilidad	(md)
k _i	Permeabilidad efectiva inicial	(md)
k _r	Permeabilidad relativa	
L	Longitud	(millas)
L _c	Longitud corregida por efecto de elevación	(millas)
L. D.	Abreviación de Línea de Descarga	
L _E	Longitud equivalente	(millas)
M	Número de Mach	
M	Masa de mezcla de fluidos	(lb _m @ cs / bl _o @ cs)
M _g	Masa del gas	(lb _m @ cs / bl _o @ cs)
M _o	Masa del aceite	(lb _m @ cs / bl _o @ cs)
M _w	Masa del agua	(lb _m @ cs / bl _o @ cs)

m	Masa	
N_c	Número de pasos de compresión	
N_{FR}	Número de Froude	
N_{gv}	Número de la velocidad del gas	
N_{lv}	Número de la viscosidad del líquido	
N_{Lv}	Número de la velocidad del líquido	
N_{pd}	Número de influencia del diámetro de la tubería	
N_{Re}	Número de Reynolds	
P	Potencia	(BHP / milla)
P	Presión	(lb _f / pg ²)
\bar{p}	Presión media	(lb _f / pg ²)
P_b	Presión de saturación o burbujeo	(lb _f / pg ²)
P_c	Presión a la salida del estrangulador	(lb _f / pg ²)
P_e	Presión corriente abajo del estrangulador	(lb _f / pg ²)
P_f	Factor de la presión en el punto de burbujeo	(lb _f / pg ²)
P_g	Presión de gas inyectado en la boca de la T. R.	(lb _f / pg ²)
P_{gv}	Presión de gas inyectado frente a la válvula en la T. R.	(lb _f / pg ²)
P_o	Presión base	(lb _f / pg ²)
P_{pc}	Presión Pseudo crítica	(lb _f / pg ²)
P_{pr}	Presión Pseudo reducida	
P_s	Presión en la primera etapa de separación	(lb _f / pg ² abs)
P_{th}	Presión en la cabeza del pozo	(lb _f / pg ² abs)
P_{ti}	Presión de los fluidos en la T. P. En el punto de inyección	(lb _f / pg ²)
P_{wf}	Presión de fondo fluyendo	(lb _f / pg ² abs)
P_w	Presión de fondo inyectando	(lb _f / pg ² abs)
P_{ws}	Presión estática	(lb _f / pg ² abs)
P_{wsi}	Presión estática inicial	(lb _f / pg ² abs)
P_1	Presión de entrada	(lb _f / pg ² abs)
P_2	Presión de salida	(lb _f / pg ² abs)
Δp	Caída de presión	(lb _f / pg ²)
Δp_a	Caída de presión por aceleración	(lb _f / pg ²)
Δp_e	Caída de presión por elevación	(lb _f / pg ²)
Δp_f	Caída de presión por fricción	(lb _f / pg ²)
Δp_{LD}	Caída de presión en la L. D.	(lb _f / pg ²)
Δp_s	Caída de presión por daño en la formación	(lb _f / pg ²)
Δp_T	Caída de presión total	(lb _f / pg ²)
Δp_v	Caída de presión en el yacimiento	(lb _f / pg ²)
q_b	Gasto obtenido a P_b	(bl @ cs / día)
q_c	Gasto obtenido para valores de $P_{wf} > P_b$	(bl @ cs / día)
q_g	Gasto total de gas producido	(pies ³ _g @ cs / día)
q_L	Gasto de líquido	(bl / día)
$q_{máx}$	Gasto máximo	(bl @ cs / día)
q_n	Gasto de aceite	(bl @ cs / día)
q_T	Gasto total en el sistema	(bl @ cs / día)
q_w	Gasto de agua	(bl @ cs / día)
R	Constante universal de los gases	10.71 (pies / mole °R)
R	Relación gas aceite instantánea	(pies ³ _g @ cs / bl _o @ cs)
RGL	Relación gas líquido	(pies ³ _g @ cs / bl _o @ cs)
R_h	Radio hidráulico	(pg)
R_s	Relación de solubilidad del gas	(pies ³ _g @ cs / bl _o @ cs)
r	Radio	(pies)
r_e	Radio de drene	(pies)
r_s	Radio de influencia del daño en la formación	(pies)
r_i	Radio interior de la T. P.	(pies)
r_w	Radio del pozo	(pies)

S_o	Saturación de aceite	
T	Temperatura	(°F)
\bar{T}	Temperatura media	(°F)
T. P.	Abreviación de la tubería de producción	
T_{bh}	Temperatura en el fondo del pozo	(°F)
T_o	Temperatura base	(°F)
T_{pc}	Temperatura Pseudo crítica	(°R)
T_{pr}	Temperatura Pseudo reducida	
V	Volumen	(pies ³)
V_i	Volumen de la T. P. corriente abajo del punto de inyección de gas	(pies ³)
v	Velocidad de flujo	(pies / seg)
\bar{v}	Velocidad media	(pies / seg)
v_b	Velocidad de la burbuja	(pies / seg)
v_f	Velocidad del fluido	(pies / seg)
v_g	Velocidad real del gas	(pies / seg)
v_L	Velocidad real del líquido	(pies / seg)
v_m	Velocidad de la mezcla	(pies / seg)
v_p	Velocidad de propagación de la onda acústica en el fluido	(pies / seg)
v_{sg}	Velocidad superficial del gas	(pies / seg)
v_{sl}	Velocidad superficial del líquido	(pies / seg)
v_t	Velocidad terminal	(pies / seg)
W, W_i	Gasto másico	(lb _m / día)
WOR	Relación agua - aceite	(bl _w @ cs / bl _o @ cs)
w_g	Gasto másico del gas	(lb _{mg} / seg)
w_m	Gasto másico de la mezcla	(lb _m / seg)
w_o	Gasto másico de aceite	(lb _{mo} / seg)
w_w	Gasto másico de agua	(lb _{mw} / seg)
y_g	Fracción molar del componente en fase gaseosa	
y_L	Colgamiento del líquido	
$y_L(0)$	Colgamiento del líquido en tuberías horizontales	
Z	Factor de compresibilidad del gas	
Y_g	Densidad relativa del gas producido	
Y_{gd}	Densidad relativa del gas disuelto	
Y_{gf}	Densidad relativa del gas libre	
Y_l	Densidad relativa del líquido	
Y_{mix}	Densidad relativa de la mezcla agua - gas - condensado	
Y_o	Densidad relativa del aceite	
Y_w	Densidad relativa del agua	
ϵ	Rugosidad de la pared en tuberías	
λ	Colgamiento del líquido sin resbalamiento	(cp)
μ_g	Viscosidad del gas	(cp)
μ_L	Viscosidad del líquido	(cp)
μ_m	Viscosidad de la mezcla	(cp)
μ_{ns}	Viscosidad de la mezcla sin resbalamiento	(cp)
μ_o	Viscosidad del aceite	(cp)
μ_{ob}	Viscosidad del aceite en el punto de burbujeo	(cp)
μ_{om}	Viscosidad del aceite muerto	(lb _m / pies ³)
ρ_g	Densidad del gas	(lb _m / pies ³)
ρ_{gsc}	Densidad del gas @ cs	(lb _m / pies ³)
ρ_L	Densidad de la mezcla de los líquidos	(lb _m / pies ³)
ρ_m	Densidad real de la mezcla	(lb _m / pies ³)
ρ'_m	Densidad real de la mezcla en la correlación de Dukler	(lb _m / pies ³)
ρ_{ns}	Densidad de la mezcla sin resbalamiento	(lb _m / pies ³)
ρ_o	Densidad del aceite	(lb _m / pies ³)
ρ_r	Densidad de Pseudo - reducida	(lb _m / pies ³)
ρ_w	Densidad del agua saturada	(lb _m / pies ³)

σ	Tensión superficial	(dinas / cm)
σ_L	Tensión superficial de la mezcla de líquidos	(dinas / cm)
σ_o	Tensión superficial del aceite	(dinas / cm)
σ_w	Tensión superficial del agua	(dinas / cm)
τ	Esfuerzo de corte	(lb _r / 100 pies ²)



Conclusiones

Conclusiones

- 1) En el presente trabajo se enfoco a la aplicación de sistemas computacionales (hardware y lenguaje de alto nivel), que al integrarlos con otros aspectos tales como: Diseño de imágenes, Síntesis de temas, Audio y video; se logró la elaboración de este Sistema Tutorial.
- 2) Dentro de la elaboración de sistemas computacionales aún no se cuenta con lineamientos, por lo que todo recae en la sensibilidad y experiencia del autor, programador o ambos; este trabajo ofrece una serie de características que debe tener el programa, ya que este Sistema (Power Flow) conjunta características de otras modalidades (Ejercitación y práctica, juegos, simulación, etc.), para lograr la facilidad de manejo de este software.
- 3) La aplicación de este Sistema a los conceptos básicos de flujo de fluidos a través de tuberías, es de gran ayuda para los estudiantes que cursan la carrera de Ingeniería Petrolera, ya que permite reforzar conceptos utilizados en el área de producción de la industria del petróleo.
- 4) En consecuencia, el alumno tendrá una alternativa más, pues el Sistema ofrece compatibilidad con equipos personales de cómputo, así como el fácil manejo y ambiente amigable del mismo, fomentando en el alumno expectativas que se requieren en esta área.
- 5) Es importante saber que Power Flow resuelve problemas específicos, y no problemas generales, pero sí es de gran ayuda en la optimización de tiempos, al llevar a cabo cálculos demasiado largos en tiempos cortos.
- 6) Con las grandes ventajas que ofrece este Sistema Tutorial, como son: Flexibilidad de tiempo, Compatibilidad con equipos personales y Contenido con enfoque directo.
- 7) No se pretende sustituir la valiosa aportación del personal académico, sino por el contrario, que la institución cuente con un mayor aprovechamiento de su infraestructura, con una herramienta más para el complemento de la cátedra.

- 8) Las pretensiones de este trabajo no se quedan aquí, sino que también lo visualizamos como el principio de la innovación y mejora constante, por lo que se recomienda la aplicación de estos sistemas en todas las áreas que la carrera ofrece, implantando día a día más y mejores Sistemas de este tipo.
- 9) Esto le permitirá al alumno una mejor y mayor adaptación en los avances tecnológicos que presenta el mercado actual, debido al uso de este tipo de software con que cuentan hoy en día las empresas.



**Bibliografía y
Referencias**

Bibliografía.

Rivera, P. E.
Aprendizaje asistido por computadoras
Texas A&M International University, COBA, 1997.

Kermit B.
Fluid property options, Technology of artificial lift methods
Tulsa, Ok., 1980

Wichert, E. y Aziz, K.
Calculate Z's for sour Gases
Hydrocarbon Processing, May, 1972

Streeter, W
Mecánica de Fluidos
McGraw - Hill, sexta edición.

UNAM.
Mecánica de Fluidos, D.C.T.
Depto. de Explotación del Petróleo, 1985

Lozano, V. E.
Apuntes de Medición y Transporte de Hidrocarburos
Depto. de Explotación del Petróleo, Facultad de Ingeniería UNAM.

Graper, C. J.
Optimizing liquids pipe line with programable calculators
Pipe line industry, July, 1980

Garaicochea, P.F., Bernal, H.C., López, O.O.
Transporte de hidrocarburos por ductos
CIPM, 1991.

Referencias.

- 1) Curso - Taller para capacitación de Instructores de Especialización.
Villahermosa, Tab. (Septiembre, 1999).
- 2) Coloquio Internacional
Educar, ¿Para qué?
Fondo de Cultura Económica, 1999.
- 3) Rodríguez, N. R. y Mendoza, O. C. R.
Un modelo educativo y aplicaciones.
Artículo presentado en las XV jornadas técnicas de la AIPM
(Septiembre, 2001).
- 4) Rodríguez, N. R.
Contraste de Modelos Educativos.
Ponencia presentada al Depto. de Explotación del Petróleo de la
Facultad de Ingeniería, México (Mayo, 2000).
- 5) Dean, C.
Quentin Whitlock, A Handbook of Computer Based Training, Kogan
Page. London, 1983.
- 6) Dennis, J. R. and Robert, J. K.
Instructional Computing, An Action Guide for Educators, Scott,
Foresman and Company. Glenview, Ill., 1984.
- 7) Kearsley, G.
Computer Based Training: A Guide to Selection and
Implementation. Addison Wesley, Reading Mas., 1983.
- 8) Kearsley, G.
Authoring: A Guide to Design of Interactive Lessons & Programs.
Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 1986.