

00568

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

2



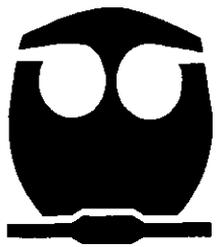
FACULTAD DE QUIMICA

**MODELO Y SIMULACION DINAMICA  
DE FLUJO BIFASICO Y  
TRANSFERENCIA DE CALOR DE  
HIDROCARBUROS PARA DISEÑO DE  
TUBERIAS**

INFORME DE TRABAJO  
PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERIA QUIMICA  
(PROYECTOS)

P R E S E N T A:  
ING. VICENTE LOPEZ GARCIA

2928015





Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

---

## DEDICATORIAS

Ante la gran satisfacción de haber terminado la maestría, dedico este trabajo a:

**A Dios**

Porque creo en él.

**A Ma. Magdalena**

Porque también es un triunfo de ella.

**A mis gordos, Jocelyn y Marco**

Porque son todo para mí.

**A mi familia**

Porque siempre contare con ustedes.

**A mis amigos**

Porque siempre habrá amistad.

¡Los quiero mucho a todos!

---

## AGRADECIMIENTOS

### **Al Dr. Yuri V. Fairuzov**

Por haber compartido sus conocimientos y apoyado en el desarrollo de este trabajo.

¡Muchas Gracias!

### **Al Dr. Julio Landgrave**

Por su apoyo en la culminación de este trabajo.

¡Muchas Gracias!

### **Al H. Jurado**

Por formar parte de este trabajo.

### **Al IMP y en especial a los Ingenieros Armando Rosas, Humberto Rangel, Javier Castro y Heladio Gómez**

Por apoyar mi desarrollo profesional.

¡Muchas Gracias!

### **A mis profesores**

Por su gran labor de enseñanza

### **A la Facultad de Química**

Por los excelentes momentos de ser estudiante.

### **A la U.N.A.M**

Porque sigue siendo la número 1.

### **A México**

Porque es un orgullo el ser Mexicano.

# INDICE

NOMENCLATURA .....	1
LISTA DE FIGURAS .....	3
LISTA DE TABLAS .....	5
INTRODUCCION .....	12
<i>Capítulo 1</i>	
<b>ANTECEDENTES</b>	
1.1 Conceptos y definiciones .....	13
1.2 Patrones de flujo en tuberías horizontales .....	19
1.2.1 Mapas de patrones de flujo horizontal	
1.3 Patrones de flujo en tuberías verticales con flujo ascendente	27
1.3.1 Mapas de patrones de flujo vertical ascendente	
1.4 Patrones de flujo en tuberías verticales con flujo descendente	35
1.4.1 Mapas de patrones de flujo vertical descendente	
1.5 Factores que determinan el patrón de flujo .....	39
<i>Capítulo 2</i>	
<b>EL FENOMENO DE DEPRESURIZACION DE DUCTOS</b>	
2.1 Generalidades .....	41
2.2 Descripción del fenómeno y eventos asociados .....	43
2.3 Revisión bibliográfica .....	45
2.4 Proceso de depresurización .....	49
2.5 Proceso de depresurización de un líquido volátil .....	53
<i>Capítulo 3</i>	
<b>MODELADO MATEMATICO</b>	
3.1 Modelo hidrodinámico .....	58

3.1.1	Modelado hidrodinámico	
3.2	Modelado de flujo en la ruptura .....	67
3.3	Modelo de transferencia de calor .....	69
3.4	Método de solución .....	74
3.5	Modelo considerando la energía cinética .....	75

*Capítulo 4*

**VALIDACION DEL MODELO**

4.1	Descripción del experimento .....	80
4.2	Validación del modelo .....	83

*Capítulo 5*

**APLICACIONES**

5.1	Línea larga con descarga en un extremo .....	90
5.2	Línea larga con descarga arbitraria .....	104

*Capítulo 6*

**CONCLUSIONES Y COMENTARIOS**

	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS .....	110
--	----------------------------------	-----

	ANEXO I .....	112
--	---------------	-----

	ANEXO II .....	115
--	----------------	-----

	BIBLIOGRAFÍA .....	172
--	--------------------	-----

## Nomenclatura

$A$	= área transversal
$C$	= coeficiente de descarga
$D$	= diámetro interno de la tubería
$F$	= factor adimensional
$f$	= factor de fricción
$G$	= velocidad másica
$h$	= entalpía específica, coeficiente de transferencia de calor
$J$	= velocidad superficial
$K$	= relación de velocidades superficiales, factor bifásico
$L$	= longitud
$M$	= masa
$N$	= número total de nodos
$m$	= gasto másico
$p$	= presión
$Q$	= gasto volumétrico, flujo externo de calor
$T$	= temperatura
$t$	= tiempo, espesor de la pared de la tubería
$U$	= energía interna, velocidad superficial
$V$	= velocidad
$W$	= velocidad del fluido
$X$	= factor para fase gaseosa
$x$	= calidad

- $Y$  = factor para fase líquida  
 $\alpha$  = fracción de vacío  
 $\beta$  = fracción de volumen a la entrada  
 $\phi$  = multiplicador bifásico  
 $\lambda$  = fracción de fase líquida  
 $\mu$  = viscosidad  
 $\nu$  = volumen específico  
 $\rho$  = densidad  
 $\partial$  = parcial

### **Subíndices**

- $d$  = deriva  
 $G$  = gas  
 $GS$  = superficial gas  
 $H$  = homogéneo  
 $k$  = unión de nodo  
 $L$  = líquido  
 $LG$  = diferencia entre las propiedades del vapor y el líquido  
 $LS$  = superficial líquido  
 $m$  = mezcla de dos fases  
 $n$  = nodo particular  
 $O$  = promedio  
 $S$  = deslizamiento  
 $w$  = pared de la tubería

## LISTA DE FIGURAS

Nº. Figura	D e s c r i p c i ó n	Nº Pag.
Figura 1.1	Patrones de flujo para líneas horizontales	21
Figura 1.2	Diagrama de Baker (modificado)	24
Figura 1.3	Mapa de regímenes de flujo de Mandhane	25
Figura 1.4	Diagrama general de Taitel & Dukler	26
Figura 1.5	Diagrama modificado de Taitel & Dukler	26
Figura 1.6	Patrones de flujo en tuberías verticales con flujo ascendente	29
Figura 1.7	Mapa de régimen de flujo de Griffith & Wallis	31
Figura 1.8	Mapa de Hewitt & Roberts	31
Figura 1.9	Mapa de régimen de flujo de Oshinowo & Charles	32
Figura 1.10	Mapa de Govier & Aziz	33
Figura 1.11	Mapa de Taitel, Barnea y Dukler	34
Figura 1.12	Patrones de flujo en tuberías verticales con flujo descendente	36
Figura 1.13	Mapa de Barnea, Shoham y Taitel	38
Figura 2.1	Propagación de la onda de depresurización	54
Figura 2.2	Propagación de la evaporación (flasheo)	55
Figura 2.3	Descarga bifásica	56
Figura 3.1	Interacción de los modelos matemáticos	57
Figura 3.2	Discretización de la tubería	58
Figura 4.1	Vista de planta del sistema de experimentación	82
Figura 4.2	Variación del inventario de la línea respecto al tiempo.	86
Figura 4.3	Variación de la presión en el extremo intacto y de la ruptura con respecto al tiempo.	86
Figura 4.4	Variación de la temperatura en el extremo intacto y de la ruptura de la línea.	87
Figura 4.5	Variación de la fracción de vacío en el extremo de la ruptura respecto al tiempo.	87
Figura 5.1	Esquema simplificado de la línea Paredón-Cactus (ejemplo 1)	90
Figura 5.2	Variación de la masa total en el ducto (ejemplo 1)	93
Figura 5.3	Variación del gasto másico en la ruptura (ejemplo 1)	93
Figura 5.4	Variación de la presión en los extremos (ejemplo 1)	94
Figura 5.5	Variación de la temperatura en los extremos (ejemplo 1)	94
Figura 5.6	Esquema simplificado de la línea Chiapas-Giraldas (ejemplo 2)	97
Figura 5.7	Variación de la masa total en el ducto (ejemplo 2)	101

## .....Continuación

Nº. Figura	D e s c r i p c i ó n	Nº Pag.
Figura 5.8	Variación del gasto másico en la ruptura (ejemplo 2)	101
Figura 5.9	Variación de la presión en los extremos (ejemplo 2)	102
Figura 5.10	Variación de la temperatura en los extremos (ejemplo 2)	102
Figura 5.11	Variación de la fracción de vacío en los extremos (ejemplo 2)	103
Figura 5.12	Esquema simplificado de la línea Paredón-Cactus (ejemplo 3)	104
Figura 5.13	Variación de la masa total en el ducto (ejemplo 3)	107
Figura 5.14	Variación de la masa total en los extremos (ejemplo 3)	107
Figura 5.15	Variación de la presión en los extremos (ejemplo 3)	108
Figura 5.16	Variación de la temperatura en los extremos (ejemplo 3)	108
Figura 5.17	Variación del gasto másico en la ruptura (ejemplo 3)	109
Figura E.1	Esquema simplificado de la línea Paredón-Cactus (ej. ilustrativo 1)	127
Figura E.2	Variación de la masa total en el ducto (ej. ilustrativo 1)	137
Figura E.3	Variación del gasto másico en la ruptura (ej. ilustrativo 1)	137
Figura E.4	Variación de la presión en los extremos (ej. ilustrativo 1)	138
Figura E.5	Variación de la temperatura en los extremos (ej. ilustrativo 1)	138
Figura E.6	Variación de la fracción de vacío en los extremos (ej. ilustrativo 1)	139
Figura E.7	Esquema simplificado de la línea Paredón-Cactus (ej. ilustrativo 2)	140
Figura E.8	Variación de la masa total en los extremos (ej. ilustrativo 2)	150
Figura E.9	Variación del gasto másico en la descarga (ej. ilustrativo 2)	150
Figura E.10	Variación de la temperatura en la ruptura (ej. ilustrativo 2)	151
Figura E.11	Variación de la temperatura en los extremos (ej. ilustrativo 2)	151
Figura E.12	Variación de la fracción de vacío en la ruptura (ej. ilustrativo 2)	152
Figura E.13	Variación de la fracción de vacío en los extremos (ej. ilustrativo 2)	152
Figura E.14	Variación de la presión en la descarga (ej. ilustrativo 2)	153
Figura E.15	Variación de la presión en los extremos (ej. ilustrativo 2)	153
Figura E.16	Variación de la masa total en el ducto (ej. ilustrativo 2)	154
Figura E.17	Esquema simplificado de la línea Chiapas-Giraldas (ej. ilustrativo 3)	155
Figura E.18	Variación de la masa total en el ducto (ej. ilustrativo 3)	169
Figura E.19	Variación del gasto másico en la ruptura (ej. ilustrativo 3)	169
Figura E.20	Variación de la presión en los extremos (ej. ilustrativo 3)	170
Figura E.21	Variación de la temperatura en los extremos (ej. ilustrativo 3)	170
Figura E.22	Variación de la fracción de vacío en los extremos (ej. ilustrativo 3)	171

## LISTA DE TABLAS

Nº. Tabla	D e s c r i p c i ó n	Nº. Pag.
Tabla 1	Los grandes accidentes en la industria	8
Tabla 4.1	Características de la tubería experimental	83
Tabla 5.1	Características de la línea Paredón-Cactus (ejemplo 1)	91
Tabla 5.2	Características de la ruptura (ejemplo 1)	91
Tabla 5.3	Características de la línea Chiapas-Giraldas (ejemplo 2)	98
Tabla 5.4	Composición del condensado (ejemplo 2)	98
Tabla 5.5	Características de la ruptura (ejemplo 2)	98
Tabla 5.6	Características de la línea Paredón-Cactus (ejemplo 3)	105
Tabla 5.7	Características de la ruptura (ejemplo 3)	105
Tabla C.1	Variables incluidas en el listado del programa	119
Tabla C.2	Variables transmitidas por el archivo de datos	121
Tabla C.3	Lista de variables recomendadas	122
Tabla D.1	Variables de los archivos de salida tipo 1	124
Tabla D.2	Variables de los archivos de salida tipo 2	125
Tabla E.1	Características de la línea Paredón-Cactus (ej. ilustrativo 1)	128
Tabla E.2	Características de la ruptura (ej. ilustrativo 1)	128
Tabla E.3	Ubicación de las variables del archivo de datos ENTRA1.DAT	131
Tabla E.4	Valor numérico de las variables del archivo de datos ENTRA1.DAT	131
Tabla E.5	Valor modificado de la variable LTOT	132
Tabla E.6	Valor modificado de la variable D	132
Tabla E.7	Resultados del archivo SALE1.OUT	133
Tabla E.8	Resultados del archivo SALE2.OUT	134
Tabla E.9	Resultados del archivo SALE3.OUT	135
Tabla E.10	Resultados del archivo SALE4.OUT	136
Tabla E.11	Características de la línea Paredón-Cactus (ej. ilustrativo 2)	141
Tabla E.12	Características de la ruptura (ej. ilustrativo 2)	142
Tabla E.13	Ubicación de las variables del archivo de datos ENTRA2.DAT	144
Tabla E.14	Valor numérico de las variables del archivo de datos ENTRA2.DAT	144
Tabla E.15	Resultados del archivo SALE5.OUT	146
Tabla E.16	Resultados del archivo SALE6.OUT	147
Tabla E.17	Resultados del archivo SALE7.OUT	148

## .....Continuación

Nº. Tabla	D e s c r i p c i ó n	Nº. Pag.
Tabla E.18	Resultados del archivo SALE8.OUT	149
Tabla E.19	Características de la línea Chiapas - Giraldas (ej. ilustrativo 3)	156
Tabla E.20	Composición del condensado	156
Tabla E.21	Características de la ruptura (ej. ilustrativo 3)	157
Tabla E.22	Ubicación de las variables del archivo de datos ENTRA3.DAT	163
Tabla E.23	Valor numérico de las variables del archivo de datos ENTRA3.DAT	163
Tabla E.24	Modificación del valor numérico de la variable ALFA del archivo de datos ENTRA3.DAT	163
Tabla E.25	Resultados del archivo SALE9.OUT	165
Tabla E.26	Resultados del archivo SALE10.OUT	166
Tabla E.27	Resultados del archivo SALE11.OUT	167
Tabla E.28	Resultados del archivo SALE12.OUT	168

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo forma parte del proyecto denominado "Desarrollo de un Código Computarizado para la Simulación Dinámica de Fugas y Evaluación de Eventos Asociados en la Ruptura de Ductos de Transporte de Hidrocarburos" (FIES 96-29-IV) dentro del programa de Fondo de Apoyo a Proyectos de Investigación con Instituciones de Educación Superior (FIES) del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). El proyecto se desarrolló en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, durante el período de julio de 96 a diciembre de 99. El autor de este trabajo participó en el proyecto como representante del IMP, desarrollando: Búsqueda, revisión y análisis bibliográfico del tema, el modelado matemático del fenómeno de descarga y su programación en Fortran, acoplamiento del modelo (ya programado) al método numérico y al programa de cálculo de propiedades termodinámicas, las simulaciones que validan el modelo y ejemplos típicos, así como la elaboración de informes técnicos.

### 1. Planteamiento del problema

Una de las funciones sustantivas de las industrias petrolera y petroquímica, es el transporte y distribución de hidrocarburos a los lugares de consumo. Para poder cumplir con el objetivo de transportación y distribución desde las áreas de recolección hasta las plantas de refinación y centros de distribución y/o venta, actualmente se cuenta con los siguientes medios de transporte:

- a) Líneas de conducción (oleoductos, gasoductos y poliductos).
- b) Autotanques (carretera).
- c) Carrotanques (vías férreas).
- d) Buquetanques (vía marítima).
- e) Otros (camiones de redilas).

Estos sistemas como cualquier otro en la industria, están propensos a tener una falla, y ésta puede ser básicamente por tres causas:

Tabla 1 Los grandes accidentes en la industria [UNEP.ORG, 1999]

AÑO	LUGAR	CAUSA	PRODUCTO	MUERTES	LESIONES	EVACUADOS
1966	Feyzin, Francia	Explosión	LPG	17	-	-
1970	Osaka, Japón	Explosión	Gas	42	-	-
1973	For Wayne, USA	Accidente ferroviario	Cloruro de vinilo	-	-	4,500
1973	Market Tree, USA	Accidente ferroviario	LPG	-	-	2,500
1974	Flixborough, UK	Explosión	Ciclohexano	28	104	3,000
1975	Beek, Holanda	Explosión	Etileno	14	107	-
1976	Seveso, Italia	Fuga	Dioxina	-	200	730
1978	Los Alfaques, España	Accidente vial	Propileno	216	200	-
1979	Isla de tres millas,	Fuga	Nuclear	-	-	200,000
1979	Mississauga, Canada	Fuga	Cloro	-	-	220,000
1980	Mandir Asad, India	Accidente Industrial	Explosivos	50	-	-
1981	Tacaoca, Venezuela	Explosión	Aceite	145	1,000	-
1984	Sao Paulo, Brasil	Explosión de ducto	Petróleo	508	-	-
1984	Bophal, India	Fuga	Metil-isocianato	2,500	10,000	300,000
1984	San Juanico, México	Explosión (Bleve)	LPG	600	7,000	200,000
1986	Basel, Suiza	Fuga	Insecticida	Contaminación en los alrededores		
1986	Chernobyl, USSR	Fuga	Nuclear	31	500	135,000
1986	Cárdenas, México	Fuga de ducto	Gas LPG	-	2	>20,000
1987	Pampa, USA	Explosión	Butano	31	-	-
1988	Mar del norte (Piper Alpha)	Explosión de ducto	de Crudo	167	-	-
1988	Tours, Francia	Fuga	Químicos	-	3	200,000
1989	UFA, USSR	Explosión de ducto	de Gas	645	623	-
1989	Pasadena, USA	Explosión de nube	Etileno	23	125	1,300
1989	Alaska, USA	Fuga	Petróleo	Contaminación en los Alrededores		
1990	Sydney, Australia	Fuga	LPG	-	-	10,000
1996	Cactus Chiapas, México	Explosión de ducto	de Gas Propano	4	25	4,000

- 1) Falla del material.
- 2) Falla operativa.
- 3) Falla accidental.

En el caso de presentarse una falla en el proceso de transporte y manejo de hidrocarburos, que ya por la propia naturaleza del fluido es peligroso, se tiene la gran posibilidad de generar graves consecuencias, que pueden ser desde simples fallas en los equipos, hasta siniestros de grandes proporciones.

Muchos de estos accidentes, además de provocar daños materiales, lesiones de personal y muertes, también tienen efectos significativos al medio ambiente, así como las inevitables pérdidas económicas.

En la Tabla 1 se muestran algunos eventos (p.e. Piper Alfa, UFA y Cactus) donde además de haber sido escenarios catastróficos, la falla de un ducto que transportaba un hidrocarburo volátil fue la causa del accidente.

La ruptura de un ducto que transporta un líquido sobrenfriado a alta presión, ocasiona una rápida depresurización del fluido (descarga). El líquido empieza a evaporarse rápidamente, cuando su presión alcanza la presión de saturación correspondiente a la temperatura del fluido y finalmente se descarga en los alrededores como una mezcla bifásica. El estudio del fenómeno de la descarga es del interés en muchos problemas de ingeniería. Una predicción exacta del flujo crítico bifásico es crucial en la simulación del accidente de pérdida de refrigerante en las plantas de energía nuclear. En las industrias química, petroquímica y del petróleo, existe una gran preocupación en lo que se refiere a la seguridad de ductos y/o tuberías altamente presurizadas que transportan sustancias tóxicas y/o inflamables. Si el líquido que transportan está sobrenfriado, por ejemplo, gas licuado de petróleo (LPG) o condensado (aceite vivo), la ruptura de una tubería puede llevar a la formación de una nube de vapor, constituyéndose así en un

riesgo mayor, debido a que se tendría la posibilidad de producirse una explosión y/o deflagración.

El proceso de descarga de un ducto que transporta un líquido volátil, presenta las siguientes características:

- El comportamiento hidrodinámico del fluido es complejo.
- Se generan bajas temperaturas en el sistema (ducto).
- Se tiene la posibilidad de formación de hidratos.
- Se tienen durante casi todo el proceso altos gastos.
- Se forma una nube explosiva.

Dado que la demanda de hidrocarburos aumenta día con día, y debido a los grandes accidentes que involucran la falla de ductos que transportan mezclas de hidrocarburos, surge la necesidad por parte de la industria, así como de agencias gubernamentales de desarrollar técnicas, herramientas, normas y regulaciones que permitan evaluar y cuantificar tales eventos, lo cual permitirá plantear estrategias de acción y así, poder disminuir los riesgos que se presentan en el proceso de transporte y manejo de hidrocarburos.

## **2. Objetivos del trabajo**

El objetivo global de este trabajo es lograr un mejor entendimiento del comportamiento de los procesos físicos que ocurren en los flujos transitorios bifásicos multicomponentes en los sistemas de tuberías de conducción, cuando ocurre una descarga de una línea que transporta un líquido sobrenfriado. La realización de este estudio tiene el propósito de desarrollar un programa de computadora, que simule el proceso de descarga y calcule las variables involucradas en él, proporcionando así los elementos mínimos necesarios para desarrollar herramientas que permitan tomar decisiones oportunas y acertadas en el estudio de análisis de riesgo de una línea de transporte de hidrocarburos. Además de apoyar a la Ingeniería de Proyectos en el establecimiento de nuevos

cráterios en el diseño, rehabilitación y/o cambio de uso de ductos, así como apoyar en el enriquecimiento de normas para el transporte de hidrocarburos.

Para poder alcanzar el objetivo global, se plantearon los siguientes objetivos secundarios:

- 1) Desarrollar un modelo matemático general para la simulación de flujos bifásicos multicomponentes en tuberías.
- 2) Desarrollar un modelo térmico que evalúe el efecto de la transferencia de calor entre la pared de la tubería y el fluido.
- 3) Estudiar el efecto de la transferencia de calor entre el fluido y la estructura del ducto en función del tiempo de descarga, los perfiles de presión y temperatura dentro de la línea y el gasto másico durante la descarga, causado por un rompimiento de la línea de conducción.
- 4) Investigar el efecto de la geometría de la tubería, la distancia entre válvulas de corte, diámetro de la tubería y el espesor de la pared, durante el proceso de depresurización de la tubería.
- 5) Desarrollar ejercicios con diferentes situaciones de descarga de ductos (diferente diámetro, longitud, orificio de descarga, etc.).

La realización de este proyecto servirá de base para formar un grupo de investigación institucional (IMP-UNAM) en el área de flujo multifásico.

### **3. Descripción del modelo**

El modelo desarrollado es un modelo numérico de flujo bifásico transitorio, que se basa en las ecuaciones de conservación de cantidad de masa, momento y energía en forma unidimensional. La interacción entre la pared y el fluido se modela mediante ecuaciones constitutivas. El modelo de flujo homogéneo de equilibrio se usa para evaluar el comportamiento del flujo bifásico en la tubería. El modelo consiste de tres partes: un modelo que evalúa la dinámica de flujo en la

tubería, un modelo de flujo en la descarga, y un modelo de transferencia de calor entre la pared de la tubería y el fluido.

El modelo se valida mediante una comparación de resultados numéricos con los datos experimentales disponibles en la literatura.

Para el cálculo de las propiedades termodinámicas de la mezcla, se utilizó el programa EQFASES (F. Barragán y Solorzano et al., 1995).

#### **4. Descripción del trabajo**

Capítulo 1, se listan los conceptos y definiciones básicas de flujo multifásico.

Capítulo 2, se da un resumen de la revisión bibliográfica del fenómeno de la descarga. Además se analizan los diferentes procesos de depresurización que se presentan de acuerdo a los tipos de fluidos transportados.

Capítulo 3, se presentan los detalles del modelo matemático, se derivan las ecuaciones básicas, se introducen las ecuaciones constitutivas y se describe el método numérico empleado para resolver las ecuaciones básicas del modelo.

Capítulo 4, se realiza la validación del modelo. Los resultados obtenidos con el modelo se comparan con los datos experimentales disponibles. En el Capítulo 5, presenta tres ejemplos tipo.

Capítulo 6, se dan las conclusiones y comentarios.

Anexo 1, se presenta el diagrama de flujo del programa con sus principales rutinas.

Anexo 2, se describe el manual de usuario del simulador desarrollado.

## ANTECEDENTES

En este capítulo se plantean los conceptos y definiciones fundamentales de flujo multifásico.

### 1.1 Conceptos y definiciones

Una fase es la cantidad de materia que es homogénea en toda su extensión tanto en su composición química como su estructura física y puede ser sólida, líquida o gaseosa [Castellan, 1987]. El flujo multifásico es el flujo simultaneo de varias fases, donde el flujo a dos fases es el caso más simple de éste [Wallis, 1969].

El término de dos componentes comúnmente es utilizado para describir los flujos en los cuales, las fases no son de la misma sustancia. Por ejemplo, el flujo de vapor-agua, son dos fases de un solo componente, mientras que para el flujo de aire-agua, es de dos componentes diferentes. Los flujos en los cuales las sustancias son inmiscibles, como pueden ser agua-aceite, son considerados flujos a dos fases, aunque ambas sean líquidas.

Existen muchos ejemplos de flujos a dos fases, tales como: la niebla, el smog, el humo, la lluvia, las nubes, la nieve, etc., que ocurren en la naturaleza. Diariamente varios procesos involucran una secuencia de diferentes configuraciones de flujo a dos fases o patrones de flujo. Por ejemplo, en una cafetera, el agua primero es calentada, hasta formar burbujas de vapor, al mismo tiempo porciones (baches) de líquido y vapor suben a través de un tubo, y el agua caliente se filtra entre los granos de café y gotea hacia un recipiente. Cuando la cerveza se derrama de una botella, el flujo de descarga es limitado por la velocidad de elevación de las burbujas del flujo tapón por el cuello de la botella.

Otro ejemplo, se puede observar en el área de prevención y control de incendios. Casi todos los extinguidores contienen mezclas multifásicas, tales como espumas, polvos y spray's.

En la gran mayoría de los procesos de las industrias química y petroquímica, se presenta el flujo multifásico, algunos ejemplos típicos son: la generación de energía, la refrigeración y la destilación.

En la industria petrolera, tan solo el transporte de hidrocarburos, es considerar por lo menos el flujo de dos fases (aceite y gas).

Así, en la mayoría de los procesos industriales, se tiene presente el flujo multifásico.

El fenómeno de la descarga de un ducto que transporta un líquido volátil, también es un proceso multifásico, y para poder estudiarlo, se requiere comprender los conceptos y definiciones fundamentales de flujo multifásico, los cuales a continuación se presentan [Chisholm, 1983]:

1) Gasto másico. Se define como la cantidad de líquido o gas medidos en unidades de masa por cada unidad de tiempo:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot \dot{A} \dots\dots\dots (1.1)$$

2) Gasto volumétrico. Se define como la cantidad de gas o líquido medido en unidades de volumen por cada unidad de tiempo:

$$Q = Q_L + Q_G \dots\dots\dots (1.2)$$

3) Flujo másico (o velocidad másica). Se define como la cantidad de masa que cruza una unidad de área transversal de la superficie de un sistema en una unidad de tiempo.

$$G = \frac{\dot{m}}{A} \dots\dots\dots (1.3)$$

4) Calidad. Es la relación del gasto másico de la fase gaseosa con respecto al gasto másico total, y esta dado por la siguiente ecuación:

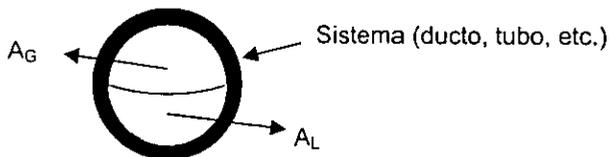
$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}} \dots\dots\dots (1.4)$$

también se calcula en términos de velocidades másicas:

$$x = \frac{G_G}{G} \dots\dots\dots (1.5)$$

5) Fracción de vacío. Es la relación de áreas ocupadas por la fase gaseosa con respecto al área total del sistema (ducto, tubo, etc.). Se define por la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{A_G}{A} \dots\dots\dots (1.6)$$



6) Fracción de volumen del líquido. Se define como la relación entre el área ocupada por la fase líquida y el área total de la tubería, también se conoce como el colgamiento (holdup), esta dada por la siguiente ecuación:

$$\alpha_L = 1 - \alpha = \frac{A_L}{A} \dots\dots\dots(1.7)$$

7) Relación de Velocidades Superficiales. Se describen con las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{V_{GS}}{V_G}; 1 - \alpha = \frac{V_{LS}}{V_L} \dots\dots\dots (1.8)$$

8) Velocidad superficial. Es la velocidad que tendría la fase si fluyera sola en la tubería. Se calcula de la siguiente forma:

$$V_{LS} = \frac{Q_L}{A}; V_{GS} = \frac{Q_G}{A} \dots\dots\dots (1.9)$$

9) Relación de velocidades. Es la relación entre las velocidades de cada fase, también se conoce como relación de resbalamiento o relación de colgamiento. Esta definida por la siguiente ecuación:

$$K = \frac{V_G}{V_L} \dots\dots\dots(1.10)$$

10) Velocidad relativa. Es la diferencia de velocidades entre las fases. Esta velocidad también se conoce como velocidad de resbalamiento:

$$V_r = V_G - V_L \quad \dots\dots\dots(1.11)$$

11) Velocidad de deriva. Es la diferencia de velocidades de la fase líquida o gaseosa con respecto a la velocidad homogénea de la mezcla, y se define por la siguiente ecuación:

$$V_d = V_{G,L} - V_H \quad \dots\dots\dots (1.12)$$

12) Relación entre la calidad y la fracción de vacío. Esta dada por la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{x \cdot v_G}{x \cdot v_G + K \cdot (1-x) \cdot v_L} \quad \dots\dots\dots (1.13)$$

13) Velocidad homogénea. Es la velocidad que se tiene cuando la relación de velocidades es igual a la unidad:

$$V_H = V_{LS} + V_{GS} \quad \dots\dots\dots(1.14)$$

14) Fracción de líquido a la entrada. Se define como la relación entre el área ocupada por la fase líquida y el área total, en la alimentación (entrada) de una tubería, también se conoce como colgamiento a la entrada (input holdup):

$$\lambda_L = \frac{Q_L}{Q_L + Q_G} \dots\dots\dots(1.15)$$

## 1.2 Patrones de flujo en tuberías horizontales

En este subíndice se describen de una manera general los diferentes tipos de patrones de flujo que se presentan en el proceso de transporte de hidrocarburos en tuberías.

Un patrón de flujo se define como la distribución geométrica de las fases, o bien como la estructura de flujo multifásico que se determina por la forma de la interfase [Bergles, 1981].

Un gran grupo de investigadores ha trabajado durante los últimos 35 años para definir los posibles patrones de flujo existentes en los sistemas horizontales. El trabajo que más se ha utilizado es el que realizaron Taitel y Dukler [1976], donde se ha obtenido un progreso importante en el desarrollo de procedimientos teóricos para la predicción de patrones de flujo, y en el cual se identifican tres patrones de flujo básicos:

Flujo Separado (o Segregado).

- Estratificado Suave.
- Estratificado con Ondas.
- Anular.

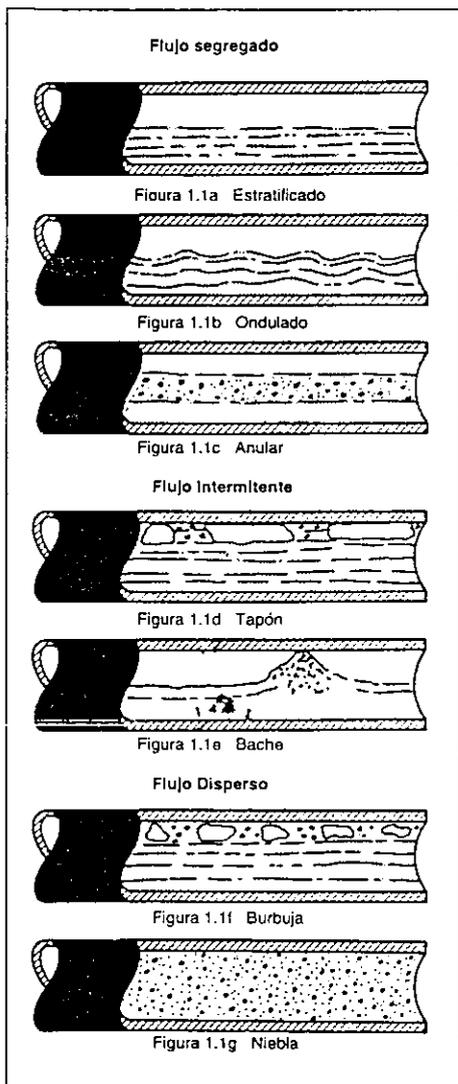
Flujo Intermitente.

- Tapón.
- Bache.

Flujo Disperso (o Distribuido).

- Burbuja.
- Niebla.

- 1) Flujo Estratificado Suave. El gas y el líquido fluyen en forma separada, ocupando una fracción constante del área transversal de la línea y formando, como límite entre ambos, una interfase (ver Figura 1.1 a). Este patrón aparece cuando las velocidades superficiales de las fases son moderadas.
- 2) Flujo Estratificado con Ondas u Ondulado. Se presenta debido a la formación de ondas en la interfase gas-líquido, producto de un aumento en la velocidad del gas (ver Figura 1.1 b), con respecto a la velocidad presentada en el flujo estratificado suave.
- 3) Flujo Anular. El líquido fluye como una película delgada a lo largo de las paredes de la tubería, formando un ánulo. El gas, por su parte, fluye por el centro del ánulo, como se puede observar en la Figura 1.1 c. Este patrón de flujo se da para velocidades superficiales de la fase líquida moderadas y de altas a muy altas de la fase gaseosa.
- 4) Flujo Tapón. Cuando se tiene flujo burbuja, las burbujas de gas presentes tienden a unirse cuando la velocidad de este aumenta, dando lugar a la formación de "tapones" de gas que ocupan gran parte del área transversal de la tubería, como se puede observar en la Figura 1.1 d.
- 5) Flujo Bache. Parte del flujo ondulado, debido a que las ondas incrementan su amplitud hasta cubrir toda la sección transversal de la tubería. Sin embargo, la cresta de la onda del líquido decrece rápidamente, formando un bache, debido a que el gas fluye a una velocidad mucho mayor que el líquido. Este patrón de flujo también puede producirse a partir del flujo tapón, cuando la velocidad del gas se incrementa manteniéndose la del líquido constante (ver Figura 1.1 e).



Flujo separado (segregado)

Estratificado suave (SS)

Estratificado con ondas (SW)

Anular (A)

Flujo intermitente

Tapón (P)

Bache (S)

Flujo disperso (distribuido)

Burbuja (B)

Niebla (M)

Figura 1.1 Patrones de flujo para líneas horizontales

- 6) Flujo Burbuja. Burbujas de tamaño moderado, como se ven en la Figura 1.1 f, se mueven a lo largo de la superficie líquida, a una velocidad aproximadamente igual a la del líquido.
- 7) Flujo Niebla. Aproximadamente todo el líquido es acarreado (arrastrado) por el gas en forma de gotas muy finas, como se puede observar en la Figura 1.1 g.

### 1.2.1 Mapas de Patrones de Flujo Horizontal

Las herramientas que se utiliza comúnmente en el estudio del flujo multifásico, y que además sirven de apoyo para definir la transición que existe entre los diferentes patrones de flujo en los diferentes sistemas de tuberías (horizontal, vertical o con inclinación), son los mapas de patrones de flujo.

Un mapa de patrón de flujo se define como un diagrama bidimensional que sirve para predecir los patrones de flujo. Sus coordenadas están dadas por parámetros de flujo, generalmente son las velocidades superficiales de las respectivas fases presentes (para el caso de flujo bifásico).

En la literatura se ha propuesto diferentes mapas de patrones de flujo, a continuación se listan algunos de los mapas más utilizados para tuberías horizontales:

- Mapa de Baker [1954]. Este mapa se obtuvo de datos experimentales. Sus coordenadas están en términos de flujo másico (ver Figura 1.2).
- Mapa de Mandhane y colaboradores [1974]. El trabajo desarrollado por los autores se basa en resultados experimentales, donde el sistema de coordenadas está en función de las velocidades superficiales de las fases (ver Figura 1.3).
- Mapa teórico de Taitel y Dukler [1976]. Este mapa es uno de los trabajos con mayor uso en el área de flujo bifásico (ver Figura 1.4), sus coordenadas están dadas en factores que determinaron los autores ( $X$  y  $K$ ). Se presenta también otro mapa, en el cual se comparan los resultados obtenidos por Mandhane (ver Figura 1.5), sus coordenadas están en términos de velocidades superficiales.

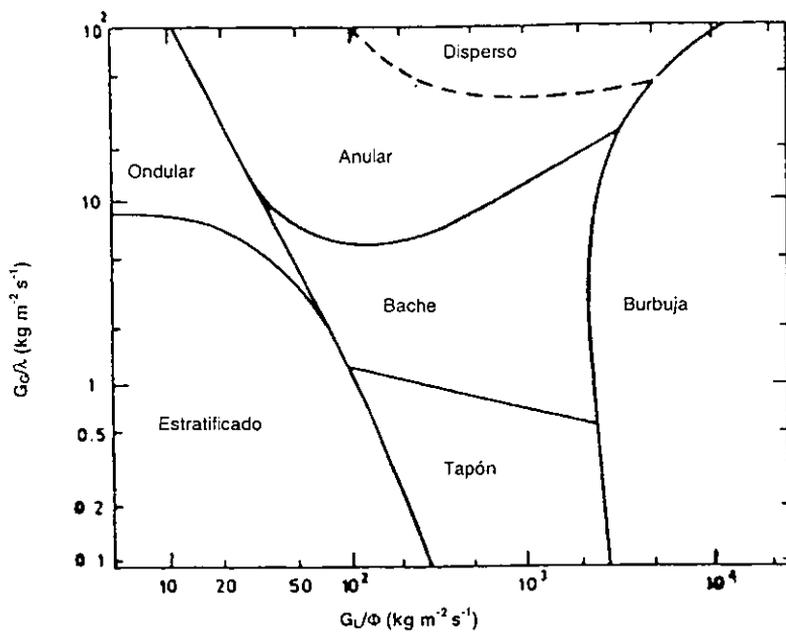


Figura 1.2 Diagrama de Baker (modificado)

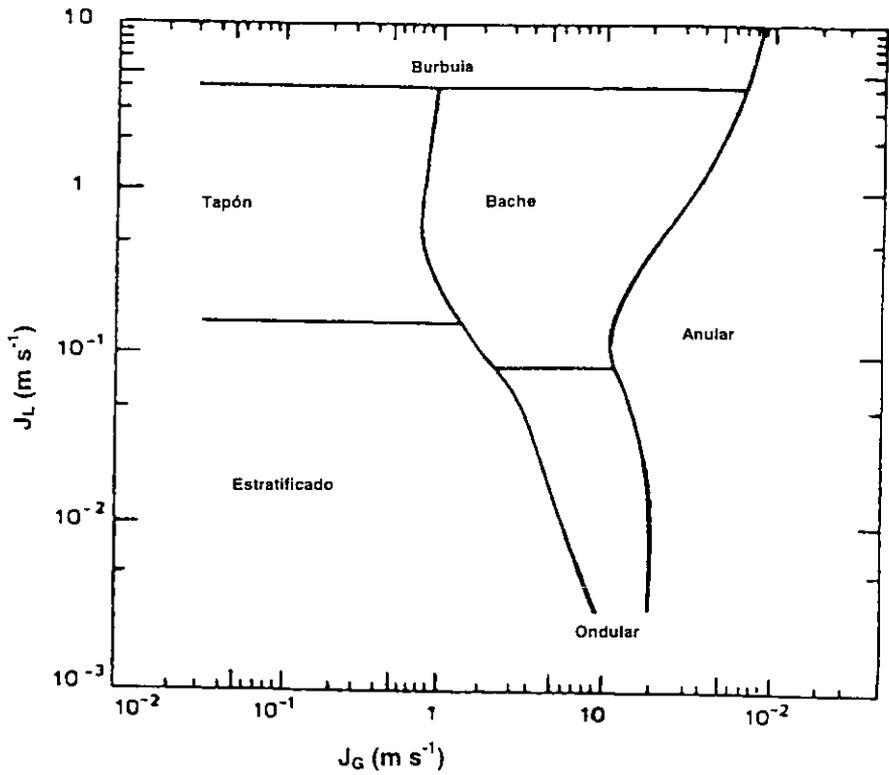


Figura 1.3 Mapa de regímenes de flujo de Mandhane

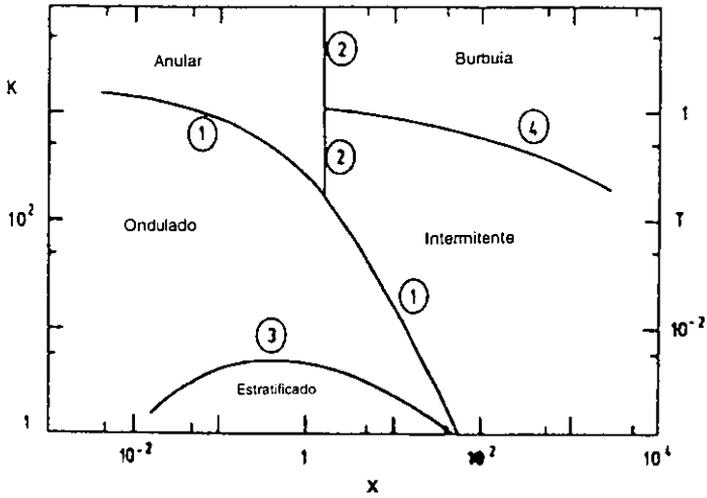


Figura 1.4 Diagrama general de Taitel & Dukler

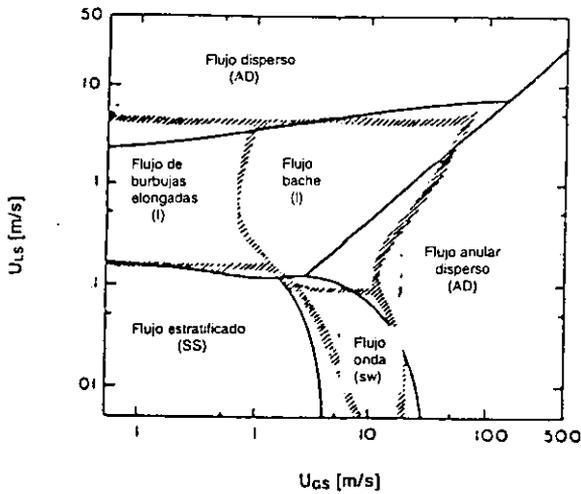


Figura 1.5 Diagrama modificado de Taitel & Dukler

### 1.3 Patrones de flujo en tuberías verticales con flujo ascendente

Como en el caso de flujo horizontal, también en los sistemas verticales, existe una gran variedad de clasificaciones para los patrones de flujo en tuberías verticales con flujo ascendente, el trabajo en el cual se basó esta investigación es en el que publicó Taitel y Dukler [1980], donde se identifican cuatro patrones de flujo:

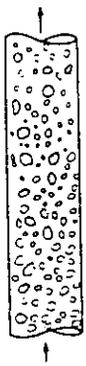
- 1) Flujo de burbujas dispersas.
- 2) Flujo bache o bala.
- 3) Flujo agitado o caótico.
- 4) Flujo anular.

1) Flujo de burbujas dispersas. El gas se dispersa en el flujo del líquido ascendente en forma de burbujas individuales de diversos tamaños. Conforme el flujo de gas aumenta, las burbujas se incrementan, tanto en número como en tamaño (ver Figura 1.6 a).

2) Flujo bache o bala. La mayor parte del gas se encuentra localizado en burbujas grandes alargadas en forma de bala que tiene un diámetro casi igual al diámetro de la tubería, como se pueden ver en la Figura 1.6 b. Estas burbujas se mueven uniformemente hacia arriba, y algunas veces se les designa como "burbujas de Taylor". Las burbujas están separadas por baches de líquido continuo, los cuales contiene pequeñas burbujas de gas. Entre las burbujas de Taylor y la pared de la tubería, el líquido fluye hacia abajo en forma de película. Algunos investigadores llaman a este flujo como flujo tapón o pistón a gastos bajos.

3) Flujo agitado o caótico. Es un poco similar al flujo bache, siendo, sin embargo, mucho más agitado, como se puede observar en la Figura 1.6 c. Las burbujas de Taylor se convierten en más angostas, y su forma se distorsiona. La continuidad del líquido en el bache entre sucesivas burbujas de Taylor se destruye repetidamente por una concentración alta local de gas. Cuando esto sucede el bache de líquido cae. El líquido se acumula, llenando completamente la tubería y es otra vez empujado por el gas hacia arriba. Este movimiento alternante del líquido es típico del flujo agitado.

4) Flujo anular. Es caracterizado por una fase gaseosa continua en la parte central y en todo lo largo de la tubería. La fase líquida se mueve hacia arriba, ya sea como una película ondulante o como gotas atrapadas en el núcleo gaseoso, como se puede ver en la Figura 1.6 d.



**Flujo de burbujas dispersas**

Figura 1.6a



**Flujo bache o bala**

Figura 1.6b



**Flujo agitado o caótico**

Figura 1.6c



**Flujo anular**

Figura 1.6d

Figura 1.6 Patrones de flujo en tuberías verticales con flujo ascendente

### 1.3.1 Mapas de Patrones de Flujo Vertical Ascendente

Los investigadores han desarrollado pocos trabajos en cuanto se refiere a mapas de patrones de flujo vertical. En la literatura se encontró diferentes mapas de patrones de flujo vertical ascendente. A continuación se presentan algunos de los mapas más utilizados:

- Mapa de Griffith y Wallis [1961]. Este mapa sólo presenta tres patrones de flujo (burbuja, bache y anular). El eje vertical tiene como coordenada el cociente de velocidades superficiales y el horizontal en términos de un factor adimensional definido por los autores(ver Figura 1.7).
- Mapa de regímenes de flujo de Hewitt y Roberts [1969]. Este mapa aplica únicamente para un sistema agua-aire hasta 5.9 bares y para un sistema agua-vapor hasta 69 bares. Sus coordenadas están en términos de velocidades másicas (ver Figura 1.8).
- Mapa de regímenes de flujo de Oshinowo y Charles [1974]. El trabajo desarrollado por los autores destaca por sus coordenadas propias que están en función de un factor  $F_1$  y la fracción de volumen a la entrada de la tubería  $\beta$  (ver Figura 1.9).
- Mapa de Govier y Aziz [1972]. Este mapa utiliza como coordenadas la velocidad superficial de líquido y gas en los ejes vertical y horizontal, respectivamente. Además, utiliza factores de corrección para algunas propiedades físicas ( $Y$ ,  $X$ ), como se puede ver en la Figura 1.10.
- Mapa de Taitel, Barnea y Dukler [1980]. Desarrollaron un mapa en donde se utilizan como coordenadas la velocidad superficial de las fases. Este es uno de los trabajos más utilizados en cuanto a flujo vertical ascendente (ver Figura 1.11).

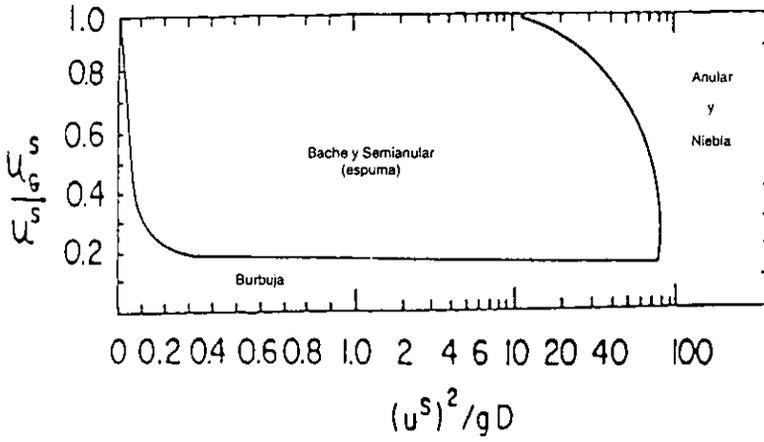


Figura 1.7 Mapa de régimen de flujo de Griffith & Wallis

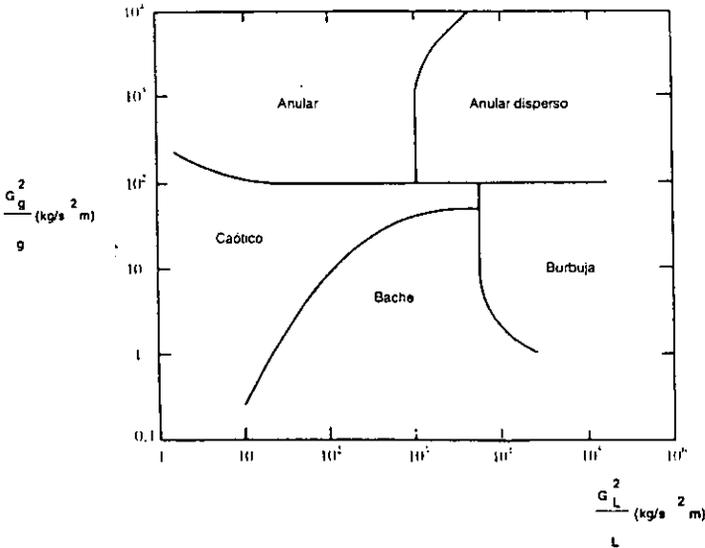
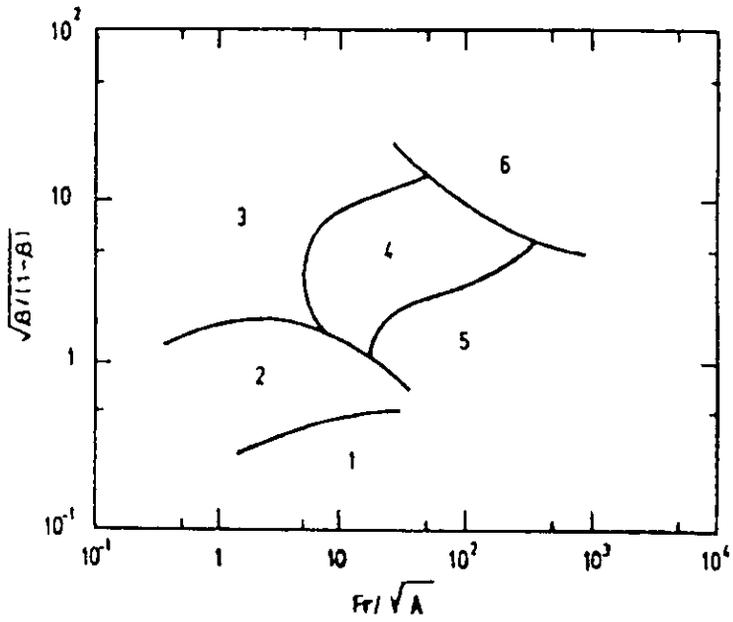


Figura 1.8 Mapa de Hewitt & Roberts



- |                        |                                    |
|------------------------|------------------------------------|
| 1. Burbuja             | 4. Anular con burbujas en película |
| 2. Bala (tapón, bache) | 5. Agitado                         |
| 3. Anular              | 6. Anular disperso                 |

Figura 1.9 Mapa de régimen de flujo de Oshinowo & Charles

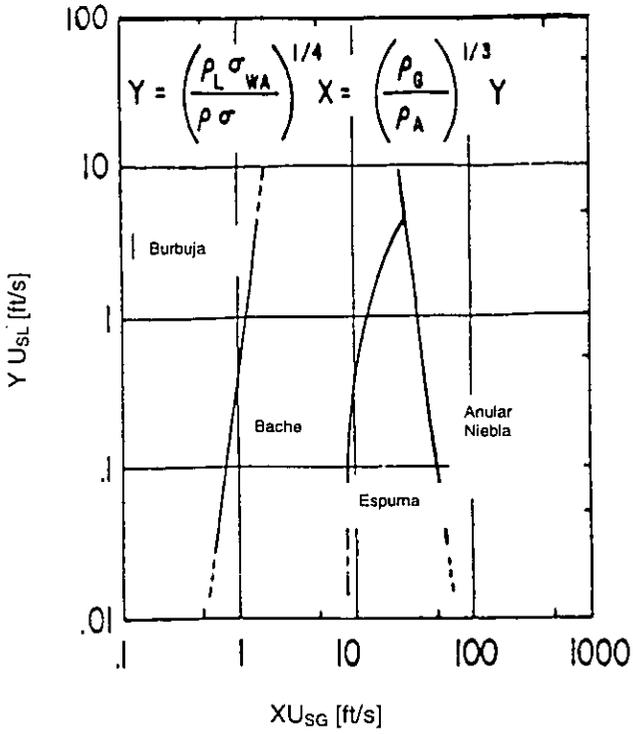


Figura 1.10 Mapa de Govier & Aziz

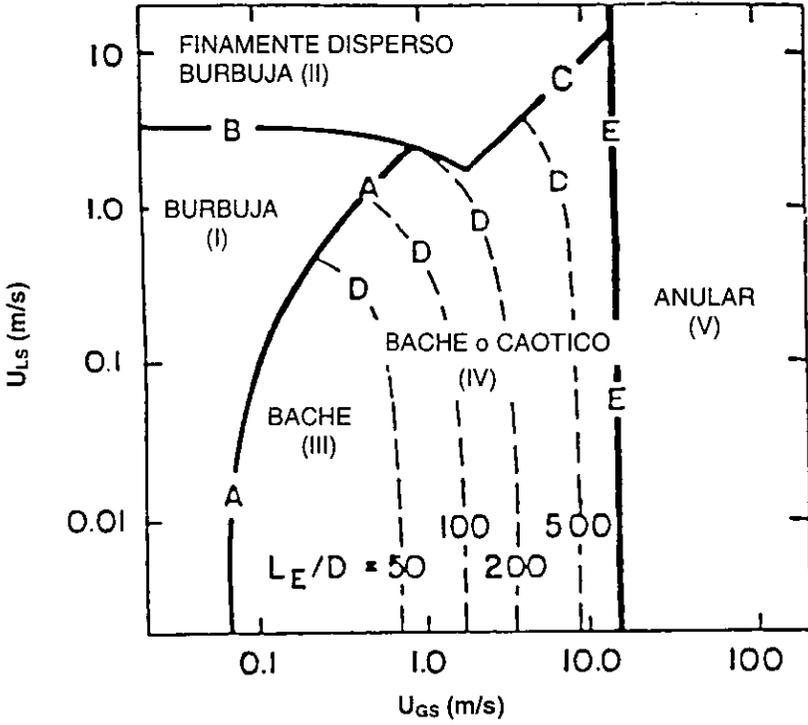


Figura 1.11 Mapa de Taitel, Barnea y Dukler

#### 1.4 Patrones de flujo en tuberías verticales con flujo descendente

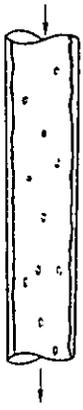
En el caso de flujo vertical descendente, se tiene un desarrollo mucho menor con respecto al flujo vertical ascendente. El trabajo realizado por Barnea, Shoham y Taitel [1982], es uno de los más utilizados, y en el cual se puede observar sólo tres patrones de flujo:

1. Flujo anular.
2. Flujo bache.
3. Flujo de burbujas dispersas.

1. Flujo anular. La descripción del flujo anular descendente es el mismo que para el ascendente. El líquido fluye hacia abajo como una película anular con un movimiento rápido del núcleo del gas, el cual contiene algunas gotas de líquido (ver Figura 1.12 a).

2. Flujo bache. Este patrón de flujo es similar al que se presenta en flujo ascendente, con la característica de que se presenta mayor turbulencia, como se puede observar en la Figura 1.12 b.

3. Flujo de Burbujas Dispersas. Las burbujas son acarreadas por la fase líquida continua hacia abajo. Sin embargo, emigran hacia el eje central de la tubería para formar un núcleo de burbujas dispersas. Las burbujas tienen diferentes tamaños y configuraciones, como se puede observar en la Figura 1.12 c.



Flujo anular

Figura 1.12a



Flujo bache

Figura 1.12b



Flujo de burbujas dispersas

Figura 1.12c

Figura 1.12 Patrones de flujo en tuberías verticales con flujo descendente

#### 1.4.1 Mapas de Patrones de Flujo Vertical Descendente

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica, la cual indica que durante los últimos 20 años el trabajo desarrollado por Barnea y colaboradores [1982] ha sido la única investigación enfocada a mapas de patrones de flujo vertical descendentes. A continuación se describe brevemente:

- Mapa de Barnea y colaboradores [1982]. Este mapa presenta únicamente tres patrones de flujo. Sus coordenadas están en términos de las velocidades superficiales de cada fase (ver Figura 1.13).

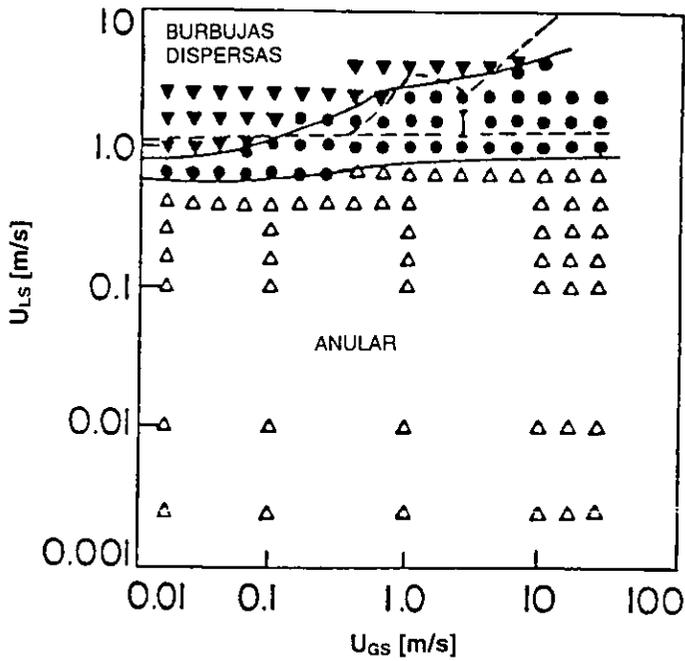


Figura 1.13 Mapa de Barnea, Shoham y Taitel

## 1.5 Factores que determinan el patrón de flujo

Los patrones de flujo existentes para los diferentes sistemas de tuberías (horizontal, vertical e inclinadas), dependen de algunos factores operacionales, geométricos y físicos. A continuación se describen brevemente las variables más importantes que influyen en la determinación de un patrón de flujo en el transporte de tuberías:

- 1) El gasto volumétrico tiende a cambiar constantemente durante la operación, por lo tanto, influye en la calidad, fracción de vacío, velocidades superficiales, etc dando origen a un flujo multifásico.
- 2) Si la presión aumenta, en el caso de un flujo en fase gas, este tiende a comprimirse. Ahora si la presión disminuye, en el caso de una fase líquida, este favorecerá la formación de la gaseosa, cambiando así la fracción de vacío y esto a su vez el patrón de flujo.
- 3) Al aumentar o disminuir la temperatura, provoca la transferencia de calor sistema - alrededores. En el caso de aumentar la temperatura en el sistema, se induce a la formación de otra fase, cuando se tiene la presencia de sólo una.
- 4) El diámetro de la tubería puede favorecer a ciertos patrones de flujo cuando hay un cambio de diámetro.
- 5) El ángulo de inclinación de la tubería también induce al cambio de patrón de flujo, básicamente cuando hay cambios de dirección de las tuberías, favoreciendo la formación de otra fase, por caída de presión y por área disponible.
- 6) En el caso de la dirección del flujo, los patrones de flujo son diferentes para flujos ascendentes que para flujos descendentes.

7) La densidad y viscosidad afectan directamente al gasto, siendo estos parámetros diferentes para cada tipo de fluido, y que a su vez resultan determinantes en la formación de un patrón de flujo.

8) La tensión superficial es determinante para la formación y estabilidad del diámetro de una burbuja o de una gota, así de esta manera el fluido tendrá una tendencia a cierto patrón de flujo.

Es por ello que en el estudio de los sistemas de transporte de hidrocarburos toma mayor importancia el considerar todas estas variables, ya que el describir el comportamiento real de los procesos multifásicos, depende del tomar en cuenta u omitir las variables involucradas en el proceso, lo cual resulta una tarea difícil de realizar.

---

## EL FENÓMENO DE DESPRESURIZACIÓN DE DUCTOS

---

Después de haber analizado y revisado los conceptos y las definiciones fundamentales de flujo multifásico en el capítulo anterior, a continuación se describen brevemente los procesos físicos que se presentan en el fenómeno de descarga de un ducto que transporta un líquido volátil.

### 2.1 Generalidades

Como se pudo observar en la Tabla 1, en México así como otros países industrializados ocurren accidentes que involucran tuberías que conducen líquidos volátiles. Muchos de estos accidentes tienen como resultado daños significativos tanto en propiedades, así como al medio ambiente, además de producir lesiones de personal y muertes.

Las rupturas en las tuberías ocurren debido a varias razones, entre ellas incluyen las fallas del material, fallas operativas, así como rupturas accidentales. Así mismo, muchos factores afectan el comportamiento de los sistemas de transporte (líneas) en eventos de falla, tales como:

- 1) La configuración de la ruptura, por ejemplo:
  - Ruptura completa o parcial.
  - Una porción de la ruptura cubierta por el terreno.
  - Orientación de la ruptura (arriba, abajo o lateral).
  
- 2) Tiempo de detección y condiciones de cierre y aislamiento de la línea, por ejemplo:
  - Tiempo de paro de equipo de bombeo.
  - Distancia entre válvulas de corte (aislamiento).

3) Conformación del terreno en sitio de la descarga, por ejemplo:

- Zona poblada.
- Cruce de un río.
- Desértico

4) Condiciones atmosféricas, por ejemplo:

- Velocidad y dirección del viento.
- Estabilidad de la atmósfera.

El proceso de transporte de un fluido multifásico conlleva una innumerable lista de problemas y restricciones, en donde no solo la tubería se ve afectada, sino también, los equipos, accesorios y sistemas de medición que se encuentran conectados a ella, además de su entorno, convirtiéndose así en un tema de sumo interés para la industria. Por ejemplo, uno de los diversos propósitos que tiene PEMEX es optimizar y modernizar los sistemas de transporte y distribución de hidrocarburos con la finalidad de proporcionar condiciones seguras, eficientes y oportunas, por lo que se ha encomendado la gran tarea de desarrollar herramientas que permitan estimar: las probabilidades y causas que podrían hacer que un ducto de transporte en particular falle, así como predecir su efecto social, económico y ecológico.

En este trabajo se estudia uno de los problemas que se presentan en el transporte de flujo multifásico. El problema que se ataca es el estudio del comportamiento del fluido durante la despresurización de una línea que transporta un hidrocarburo volátil (blowdown).

## 2.2 Descripción del fenómeno y eventos asociados

Cuando se presenta la ruptura de una línea que contiene un líquido subenfriado a alta presión, en primer lugar se produce una rápida despresurización del sistema, el líquido presente comienza a evaporarse (flashear) inmediatamente después de que alcanza su presión de saturación correspondiente a la temperatura del sistema, y posteriormente se descarga a los alrededores como una mezcla bifásica.

. Además de que el fenómeno de descarga por si mismo ya es un problema de contaminación al medio ambiente, se presentan otras situaciones de riesgo relacionados a este fenómeno, tales como:

- 1) La rápida despresurización de dispositivos y tuberías enterradas de gas, petróleo y condensados es una operación peligrosa. En el caso de recipientes, el peligro surge debido a las bajas temperaturas que genera el fluido en las paredes del dispositivo. Esto conduce a una reducción en la temperatura por debajo del punto de transición dúctil-frágil del material del cual fue fabricado [Haque et al., 1990]. En el caso de la descarga de tuberías, el riesgo surge no solo debido a las bajas temperaturas generadas en la pared de la línea, sino también debido a los altos gastos que se presentan cuando ocurre la descarga en un ducto de transporte (de gran longitud).
- 2) La predicción del gasto másico de recipientes o tuberías rotas, también es importante no solo para la evaluación de la cantidad del gas (fluido) que escapa del recipiente o tubería, sino también para el cálculo de las fuerzas producidas por el chorro al expandirse y que actúan sobre la tubería, recipiente o bien sobre el equipo que pueda localizarse en la vecindad de la fuga.
- 3) El conocimiento de los perfiles de temperatura y presión a lo largo de toda la tubería, también se requiere para evaluar exactamente el potencial de formación de hidratos y parafinas durante procesos transitorios operacionales, tales como

apertura y cierre de la línea, que en el caso de las tuberías provocaría su obstrucción [Erickson & Mai, 1992].

4) Durante el proceso de diseño de las nuevas líneas de conducción, existe una gran necesidad en las predicciones de características transitorias de los sistemas considerados para un cierto número de escenarios de su funcionamiento.

Debido a todas estas consecuencias producidas por una fuga de tuberías de transporte, tanto la industria petrolera como la petroquímica tienen el gran interés por el desarrollo de técnicas, modelos y herramientas que permitan evaluar y predecir las características de tal fenómeno, y así poder tomar acciones y decisiones que ayuden a minimizar las posibles situaciones de riesgo al presentarse este tipo de eventos.

A pesar de que el fenómeno de descarga de líneas (largas) tiene un alto grado de peligrosidad, tanto para su propio sistema como para su entorno, se tiene además latente como riesgo en la industria del petróleo y petroquímica. Se presenta un obstáculo anexo para su estudio, debido a que se cuenta con muy poca información sobre sus características. Es por ello, que en el siguiente subcapítulo se presenta un resumen de una extensa revisión bibliográfica sobre el fenómeno de la descarga de líneas.

### 2.3 Revisión bibliográfica

En la literatura se revisaron los trabajos que se han realizado hasta el momento sobre el fenómeno de la descarga de líneas, identificándose las aportaciones de cada uno de ellos, las cuales a continuación se describen brevemente.

La mayoría de los trabajos que se han realizado para estudiar las características de una descarga se han concentrado en recipientes o tuberías muy cortas, y el enfoque ha sido sobre sistemas de un solo componente (agua-vapor) y además no están dirigidos al manejo de hidrocarburos. Un ejemplo representativo de este caso puede observarse en los trabajos que realizaron Leung y colaboradores [1990]. Otros trabajos realizados se encuentran dirigidos particularmente al manejo de recipientes que manejan hidrocarburos, tal es el caso de la publicación realizada por Eggers y colaboradores [1990], donde presenta los resultados de experimentos sobre la descarga de recipientes cargados con dióxido de carbono. Haque y colaboradores [1990] muestran algunos datos experimentales sobre la rápida despresurización de recipientes largos. Mckee [1990] elaboró técnicas aproximadas para el cálculo del tiempo de la descarga y la cantidad de masa del gas transferido en la descarga, utilizando técnicas de gráficos y analíticos, emplea gas natural como fluido de prueba. Nielse [1991] presentó un modelo sencillo de equilibrio homogéneo sobre la descarga multifásica de recipientes, el cual no fue validado experimentalmente. Barua y colaboradores [1992] desarrollaron un método de cálculo simplificado para la descarga de recipientes. Overa y colaboradores [1993] presentaron un modelo para recipientes parcialmente llenos de líquido.

El fenómeno de la descarga de líneas largas ha recibido comparativamente poca atención en la literatura y en algunos casos el objetivo del estudio no es el de evaluar las características del fenómeno y en otros son la mejora de un estudio anterior.

Morrow y colaboradores [1980] desarrollaron un modelo analítico para descargas de líneas para evaluar los riesgos de flamabilidad asociados a la descarga, el fluido de trabajo fue gas LPG, no presenta validación de su modelo. Grolmes y colaboradores [1984], este trabajo es uno de los dos más completos que se han publicado hasta el momento debido a que considera la descarga transiente de un líquido volátil, el problema fue estudiado usando diferentes modelados, el modelo homogéneo y el modelo de deriva, resultando mejor la valoración con el segundo modelo, el estudio lo realiza considerando un proceso adiabático, omitiendo la capacidad térmica del ducto. Goh [1989] desarrolla un método semi-empírico, considera un gas termodinámicamente cuasi-ideal, su modelo no es validado experimentalmente. Botros y colaboradores [1989] desarrollaron un modelado analítico, el fluido de prueba que utilizaron fue un gas, el cual se consideró como un gas ideal, el estudio se verificó y validó con resultados experimentales. El modelo aplica sólo para gases, por lo cual no se puede extender a sistemas multifásicos.

Tam & Higgins [1990] presentan un modelo empírico soportado por una gran escala de pruebas experimentales que predice la rapidez del flujo másico de descarga, utiliza como fluido de prueba gas LPG. Richardson & Saville [1991] elaboraron un programa de computadora el cual puede utilizarse para simular una descarga de una tubería transportando hidrocarburos, emplea un modelo cuasi-estable para flujo bifásico, muestra una validación limitada del modelo. Norris [1993] combina un estudio experimental con un programa analítico para desarrollar su modelo, utiliza como fluido de prueba dióxido de carbono, el cálculo de las propiedades del fluido se realizan externamente. Chen y colaboradores [1995<sup>a</sup>] utilizan el modelo de dos fluidos, considera una mezcla multicomponente, en el cual ambas fases pueden salir del estado de equilibrio (por que consideran deslizamiento entre fases), presentaron un estudio detallado de la descarga de una tubería conteniendo un líquido volátil (gas LPG), se apoyaron en un método numérico simplificado (extensión del principio variacional de Geurst [1986] para flujo burbuja).

Como se puede observar en esta revisión bibliográfica, pocos trabajos atacan el problema de la descarga de líneas largas, algunos trabajan sistemas multicomponentes y sólo dos validan su modelo, pero ningún estudio toma en cuenta el efecto de la transferencia de calor entre el fluido y la pared de la tubería de transporte.

En cuanto a la metodología de análisis del fenómeno que utilizan los autores antes descritos, se pueden identificar dos técnicas:

- 1) Técnica experimental.

De esta técnica surgen las correlaciones.

- 2) Técnica numérica.

De esta técnica surgen los modelos mecanísticos y el modelado numérico.

En base a la revisión analítica anteriormente descrita, se formuló la siguiente meta para la realización de este trabajo:

*Reproducir el fenómeno de la descarga utilizando un modelado numérico simple, que permita obtener resultados acordes a los experimentales, además de tener tiempos de computo menores que los reportados actualmente, lo cual llevará a la obtención de conclusiones rápidas.*

Para poder cumplir con la meta anteriormente descrita fue necesario plantear los siguientes objetivos de trabajo:

- 1) Simular la descarga como un proceso transiente, en otras palabras, considerar la variación de las propiedades con respecto al tiempo del proceso.
- 2) Utilizar el modelo homogéneo de equilibrio en el desarrollo del modelado hidrodinámico del sistema.

- 3) Evaluar al líquido volátil como una mezcla multicomponente.
- 4) Tomar en cuenta el efecto de la transferencia de calor entre la pared de la tubería y el fluido.
- 5) Estimar las propiedades termodinámicas de la mezcla internamente al modelo utilizando ecuaciones de estado.

## 2.4 Proceso de Despresurización

Dentro de la revisión en la literatura, se encontró que el fenómeno de despresurización de un ducto es característico de acuerdo al tipo de fluido que se transporta, por lo que en este inciso se describen brevemente los diferentes procesos de despresurización que se presentan en un evento de descarga en líneas de transporte de hidrocarburos a alta presión.

En primer lugar el proceso de despresurización se define como la disminución abrupta de presión de un sistema (recipiente o tubería). Este proceso cuenta con diferentes etapas durante su desarrollo y varía su comportamiento de acuerdo a los diferentes tipos de fluidos que se manejan durante el transporte de hidrocarburos [Richardson & Saville, 1991]. Para el caso del estudio de la descarga, se clasifican en tres grandes grupos los fluidos comunes de transporte en la industria:

- 1) Líquido no-volátil.
- 2) Líquido volátil.
- 3) Gas.

y cada uno de estos fluidos presenta diferentes etapas de despresurización, como a continuación se describe:

### **1) Despresurización de líquidos no-volátil.**

Para el proceso de despresurización de tuberías conteniendo un líquido no-volátil (el cual es representativo del aceite muerto), se puede considerar que el proceso ocurre en 2 etapas:

#### Etapa 1.

Después de la ruptura de una línea a alta presión, ocurre inmediatamente un movimiento de una onda de expansión (onda de despresurización) en dirección desde el extremo roto de la línea hasta la parte del extremo intacto. El flujo que es descargado es estrangulado en el extremo roto inicialmente por un periodo breve

de tiempo posterior al momento de la ruptura, al mismo instante la presión en el extremo intacto no cambia con respecto a la presión inicial.

#### Etapa 2.

Una vez que la onda de expansión alcanza el extremo intacto, la presión comienza a disminuir. La fricción del líquido en la línea es cuasi-estable. La principal contribución a la caída de presión en la línea aumenta debido a la fricción en la pared de la tubería.

#### **2) *Despresurización de líquidos volátiles.***

El proceso de despresurización de una línea transportando un líquido volátil (representativo del aceite vivo y otros hidrocarburos) ocurre en 3 etapas.

#### Etapa 1.

En el momento que sucede la ruptura de la línea se presenta un desplazamiento de una onda de expansión en dirección desde el extremo roto hasta el intacto. El flujo es estrangulado en la ruptura por unos instantes posterior al momento de la ruptura. La presión en el extremo intacto no cambia con respecto a la presión inicial. Esta etapa se presenta de la misma forma que para sistemas que transportan líquidos no-volátiles.

#### Etapa 2.

Una vez que la onda de expansión alcanza el extremo intacto, la presión inicial en aquel punto comienza a disminuir. La fricción del líquido en la línea es cuasi-estable. La principal contribución a la caída de presión en la línea aumenta debido a la fricción en la pared de la tubería. También esta etapa se presenta de la misma forma que para sistemas que transportan líquidos no-volátiles.

#### Etapa 3.

Cuando la presión en la línea disminuye suficientemente hasta alcanzar la presión de saturación del líquido transportado, comienza la aparición (formación) de una

fase gaseosa. La fricción de las dos fases (líquido-gas) en la línea es cuasi-estable. La principal contribución a la caída de presión en la línea continua aumenta debido a la fricción en la pared de la tubería.

### **3) *Despresurización de gas.***

La despresurización de una línea conteniendo gas se puede considerar también que sucede en tres etapas.

#### **Etapa 1.**

En el instante de la ruptura se presenta el movimiento de una onda de expansión en dirección desde la ruptura hacia el extremo intacto de la línea. El fluido que se descarga es estrangulado en la ruptura. La presión en el extremo intacto es la misma de la presión inicial. Para los tres tipos de despresurización que mencionamos se presenta esta primera etapa.

#### **Etapa 2.**

Una vez que la onda de expansión alcanza el extremo intacto, la presión de este punto comienza a disminuir. La fricción del gas estrangulado en la línea es cuasi-estable. El fluido continúa siendo estrangulado en la ruptura. La principal contribución a la caída de presión en la línea aumenta debido a la fricción en la pared de la tubería.

#### **Etapa 3.**

Cuando la presión en la línea cae suficientemente, el flujo en la ruptura deja de ser estrangulado. La fricción del gas no-estrangulado en la línea es cuasi-estable. La principal contribución a la caída de presión en la línea aumenta debido a la fricción en la pared de la tubería.

Para una despresurización a través de un orificio con un diámetro equivalente pequeño comparado con el diámetro de la tubería, las etapas 1 a 3 ocurren secuencialmente. Cuando el diámetro equivalente del orificio es comparable con el

orificio de la tubería, por ejemplo para una ruptura total, el cambio de la fase líquida a la fase gaseosa empieza en el extremo roto de la línea casi inmediatamente después de la ruptura, entonces la etapa dos se anexa con la uno. Para la despresurización de una línea inicialmente conteniendo un flujo bifásico (líquido mas gas) la etapa dos no se presenta.

## 2.5 Proceso de despresurización de un líquido volátil

En este inciso se complementa la descripción del proceso de despresurización de una línea que transporta un líquido volátil, debido a que es el caso que se estudia en el presente trabajo.

El proceso de despresurización de un líquido volátil, puede dividirse en 3 etapas [Fairuzov, 1998]:

- 1) Propagación de la Onda de Despresurización.
- 2) Propagación del Flasheo.
- 3) Descarga Bifásica.

### 1) *Propagación de la onda de despresurización.*

Cuando se presenta la ruptura de una línea que transporta un líquido volátil, en la ruptura de la tubería se produce una rápida despresurización del fluido ( $10^3 \dots 10^4$  bar/s). Este proceso de propagación de la onda de despresurización se produce a lo largo de toda la tubería a la velocidad local del sonido, ocurriendo en un periodo de tiempo muy corto. Esta propagación ocurre en flujo de una sola fase en dirección hacia el extremo intacto. La presión en el extremo intacto no cambia con respecto a la presión inicial durante el proceso de la onda de expansión. El flujo que se descarga es estrangulado en el extremo roto. Después de que la onda de expansión ha alcanzado el extremo intacto, la presión del fluido en la tubería es muy cercana a la presión de saturación correspondiente a la temperatura del fluido.

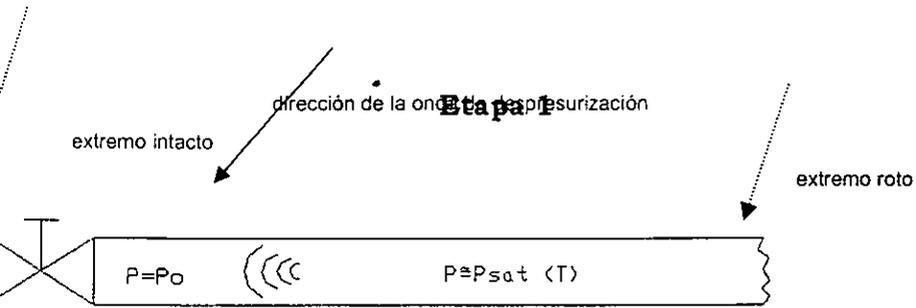


Figura 2.1 Propagación de la onda de despresurización.

## 2) Propagación de la evaporación.

La propagación de la evaporación (flasheo) a lo largo de la tubería inicia en el extremo roto en dirección hacia al extremo intacto. El fluido bifásico presente en el extremo roto continúa siendo estrangulado. Cuando la presión en el extremo roto ha perdido un valor suficiente, el flujo bifásico que sale de la tubería deja de ser estrangulado.

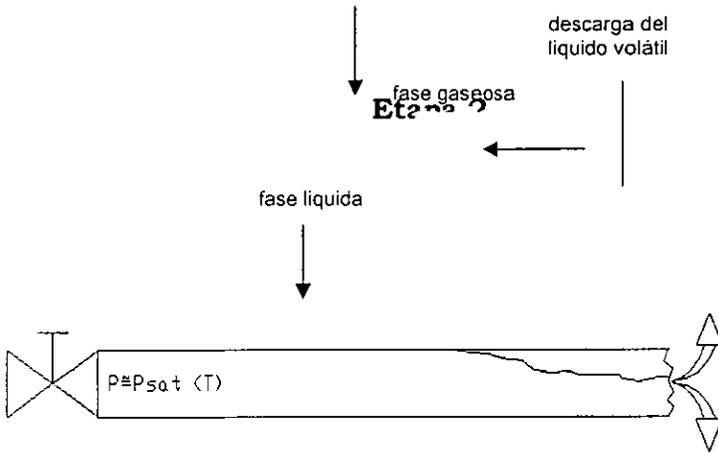


Figura 2.2 Propagación de la Evaporación (flasheo)

### 3) Descarga bifásica.

Después de que el frente de vaporización (flasheo) ha alcanzado el extremo intacto, el flasheo ocurre dentro de toda la tubería. El proceso de flasheo causa cambios constantes de los patrones de flujo. La temperatura del fluido disminuye debido a la caída de presión del fluido. La pared de la tubería es enfriada por el fluido que es transportado a través de la tubería. En el extremo roto se presenta una descarga bifásica.

o bifásico

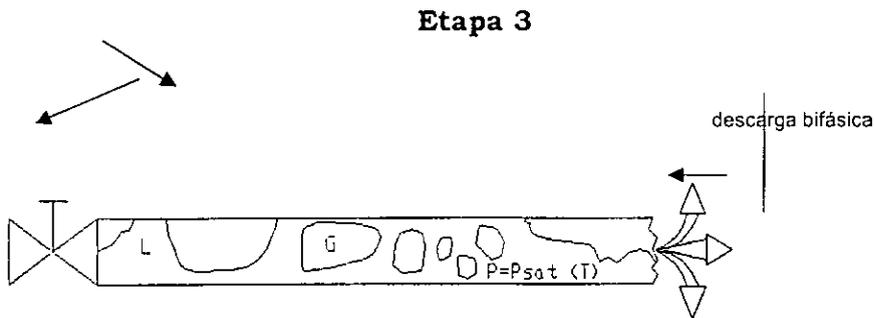


Figura 2.3 Descarga bifásica

## MODELADO MATEMÁTICO

Después de haber establecido reproducir el fenómeno de la descarga utilizando una solución numérica, se establece en este capítulo la formulación matemática que reproduce al proceso de descarga de un ducto que transporta una mezcla multicomponente, la cual es la base para el programa de cálculo desarrollado. También se muestran las ecuaciones básicas de conservación que gobiernan al proceso, así como las ecuaciones constitutivas que describen las interacciones en la interfase pared-fluido. Asimismo, se describe el método numérico propuesto para la solución del modelo.

El modelo desarrollado en este trabajo aplica para la simulación de una descarga transitoria de un ducto que transporta una mezcla multicomponente. En la Figura 3.1 se muestra la estructura del modelo matemático, el cual consiste básicamente de 3 partes:

- 1) Modelo Hidrodinámico.
- 2) Modelo de Flujo en la Ruptura.
- 3) Modelo de Transferencia de Calor.

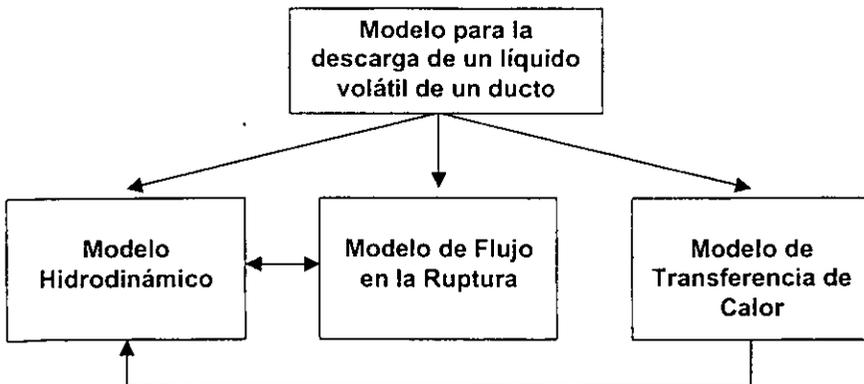


Figura 3.1 Interacción de los modelos matemáticos

### 3.1 Modelo hidrodinámico

El modelo hidrodinámico describe el flujo transiente bifásico multicomponente en la tubería, y para poder desarrollarlo se utilizó el modelo homogéneo de equilibrio, el cual se basa sobre las siguientes suposiciones:

- 1) El flujo es unidimensional.
- 2) La velocidad de ambas fases es igual.
- 3) La mezcla está en equilibrio termodinámico con ambas fases a condiciones de saturación.
- 4) Las propiedades se calculan como las de un pseudo fluido en una sola fase.

Cabe hacer mención que las anteriores suposiciones generan un error de cálculo de 2 a 4% del valor real, para cuestiones de ingeniería estos márgenes son aceptables. La validación de estas suposiciones para el flujo bifásico en tuberías largas fue demostrada por varios investigadores, por ejemplo, Wallis [1980], Chen y colaboradores [1995b]. La aproximación del modelado consiste de seccionar una tubería en un numero de volúmenes de control o "nodos" que están conectados entre sí por cruces o uniones. Se escriben para cada nodo las ecuaciones de conservación de masa y energía. La ecuación de momento es utilizada para calcular la velocidad del flujo a través de los cruces. La discretización de la tubería utilizada para la simulación numérica esta ilustrada en la Figura 3.2.

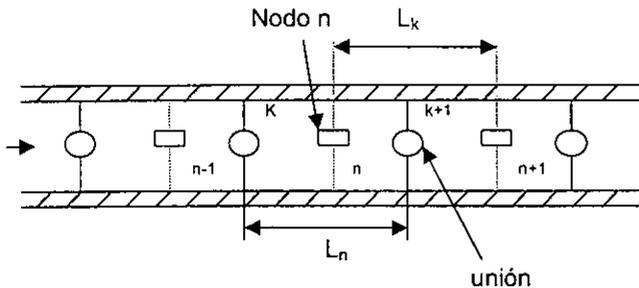


Figura 3.2 Discretización de la tubería

Las ecuaciones que gobiernan el flujo transiente bifásico multicomponente en tuberías pueden escribirse de la siguiente forma:

Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{dM_n}{dt} = \dot{m}_k - \dot{m}_{k+1} \dots\dots\dots (3.1)$$

Balance de Momento:

$$\frac{d m_K}{dt} = \frac{A}{L_K} \cdot (P_n - P_{n+1} - \Delta P_{F,n} - \Delta P_{F,n(n+1)} - \Delta P_{M,K}) \dots\dots\dots (3.2)$$

donde:

$$L_K = \frac{L_n + L_{n-1}}{2} \dots\dots\dots (3.3)$$

$\Delta P_{F,n}$  es la caída de presión debido a fricción en el nodo n;  $\Delta P_{M,K}$  es la caída de presión debido a cambio de momentum.

La pérdida de presión bifásica debido a fricción en el nodo n es determinada por:

$$\Delta P_{F,n} = \phi_{LO,n}^2 \cdot \frac{f_n G_n^2 v_{f,n}}{2D} \cdot \frac{L_n}{2} \dots\dots\dots (3.4)$$

donde:

$$G_n = \frac{\dot{m}_n}{A} \dots\dots\dots (3.5)$$

El multiplicador bifásico de fricción ( $\Phi^2_{Lo,n}$ ) es calculado utilizando la correlación de MacAdams y colaboradores [1942]:

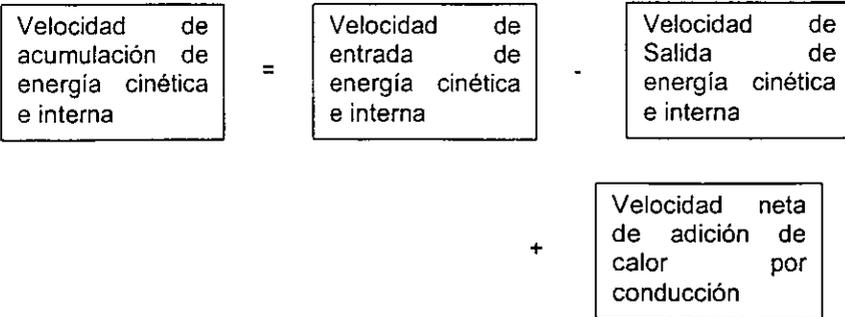
$$\Phi^2_{Lo,n} = \left( 1 + X \cdot \left( \frac{v_g - v_f}{v_f} \right) \right)_n \cdot \left( 1 + X \cdot \left( \frac{\mu_f - \mu_g}{\mu_g} \right) \right)_n^{-1/4} \dots\dots\dots (3.6)$$

La caída de presión debido a cambios de flux de momento para tuberías es determinada por:

$$\Delta P_{M,K} = G_K^2 \cdot (v_{n-1} - v_n) \dots\dots\dots (3.7)$$

Balance de Energía:

El balance de energía para el fluido contenido en el sistema a tratar se describe de la siguiente forma:



$$\frac{d}{dt} \left( U_n + M_n \cdot \frac{W^2}{2} + U_w \right) = \dot{m}_k \cdot \left( h + \frac{W^2}{2} \right)_{n-1} - \dot{m}_{k+l} \cdot \left( h + \frac{W^2}{2} \right)_n + Q_n \dots (3.8)$$

La ecuación general de energía requiere del conocimiento de la velocidad del flujo másico y de las de las velocidades en el centro de los nodos. Así de esta forma, las variables son definidas en la entrada y salida de los nodos. Se utilizan las siguientes relaciones auxiliares para satisfacer la formulación:

Condición de Inestabilidad.

$$\dot{m}_n = \frac{\dot{m}_K + \dot{m}_{K+1}}{2} \dots\dots\dots (3.9)$$

Velocidad.

$$W_n = \frac{\dot{m}_n v_n}{A} \dots\dots\dots (3.10)$$

*En el caso de este estudio donde se consideran sistemas totalmente horizontales el efecto de la energía potencial en el balance de energía no es muy significativo, por lo que se desprecia este término de la ecuación general. La influencia del cambio de energía cinética se discute en el inciso 3.5, para el caso de la validación del modelo, sólo se tomara en cuenta en la ecuación de energía el término de la energía interna del fluido por utilizarse un sistema (distancia) muy corto:*

Ecuación general de energía:

$$\frac{dU_n}{dt} = \dot{m}_K \cdot h_{n-1} - \dot{m}_{K+1} \cdot h_n + Q_n \dots\dots\dots (3.11)$$

En las ecuaciones anteriores las propiedades termodinámicas de la mezcla multicomponente son función de la presión, temperatura y composición (o calidad). La composición total de la mezcla se considera que es constante a lo largo de la tubería. Las composiciones del vapor y líquido cambian con la presión y

temperatura como un resultado de la transferencia de masa interfacial. Las propiedades termodinámicas y de transporte del fluido son calculadas utilizando un programa de computadora (simulador EQFASES) para predecir el equilibrio líquido-vapor multicomponente desarrollado por Solorzano y colaboradores [1996]. El programa se basa en las ecuaciones de estado de Redlich-Kwong-Soave (RKS) y Peng-Robinson y permite el uso de nueve reglas de mezclado. La ecuación de estado RKS en combinación con correlaciones líquido-gas [Reynolds, 1979] se utilizan en este trabajo.

En el extremo intacto, ya sea presión o flujo tienen que ser especificados como una condición de frontera, y así poder resolver el sistema de ecuaciones (inciso 3.1.1). Además en el extremo roto, el flujo descargado es especificado utilizando un modelo de flujo en la ruptura, el cual se discute posteriormente (inciso 3.3). El flujo se considera que está estancado, inicialmente.

Se utiliza un espaciado nodal teniendo la propiedad de ser exponencialmente decreciente en dirección al extremo roto, donde toman lugar grandes gradientes de parámetros de flujo. La longitud de los nodos es determinada por la siguiente fórmula:

$$L_n = L_0(F_n - F_{n-1}) \dots\dots\dots (3.12)$$

donde:

$$F_n = \left(\frac{n}{N}\right)^m \dots\dots\dots (3.13)$$

3.1.1 Modelado hidrodinámico

En este inciso se describe brevemente la deducción del modelo hidrodinámico. Para poder desarrollar este modelado se utilizaron dos ecuaciones básicas, tanto la de conservación de masa (continuidad) como la de energía.

Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{dM_n}{dt} = \dot{m}_k - \dot{m}_{k+1} \dots\dots\dots (3.1.1)$$

Ecuación general de energía:

$$\frac{dU_n}{dt} = \dot{m}_k \cdot h_{n-1} - \dot{m}_{k+1} \cdot h_n + Q_n \dots\dots\dots (3.1.2)$$

donde:

$$U_n = M_n \cdot u \dots\dots\dots (3.1.3)$$

$$u = h - p \cdot v \dots\dots\dots (3.1.4)$$

al sustituir las ecuaciones 3.1.3 y 3.1.4 en la ecuación 3.1.2 se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dU_n}{dt} = \frac{d[M_n \cdot (h - p \cdot v)]}{dt} \dots\dots\dots (3.1.5)$$

al desarrollar el termino derecho de la ecuación 3.1.5 se obtiene lo siguiente:

$$\frac{dU_n}{dt} = M_n \cdot \frac{d(h - pv)_n}{dt} + (h - pv)_n \cdot \frac{dM_n}{dt}$$

$$\frac{dU_n}{dt} = M_n \cdot \frac{dh_n}{dt} - M_n p \cdot \frac{dv_n}{dt} - M_n v_n \cdot \frac{dp}{dt} + (h - pv)_n \cdot (\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}) \dots (3.1.6)$$

por otro lado, la densidad se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{dv_n}{dt} = - \frac{v_n}{M_n} \cdot \frac{dM_n}{dt} \dots (3.1.7)$$

al sustituir la ecuación 3.1.7 en la 3.1.6 y simplificando términos, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dU_n}{dt} = M_n \frac{dh_n}{dt} - M_n v_n \cdot \frac{dp}{dt} + h_n (\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}) \dots (3.1.8)$$

ahora si se iguala la ecuación 3.1.8 con la 3.1.2 y se despeja du/dt, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dh_n}{dt} = \left[ \frac{\dot{m}_k h_{n-1} - \dot{m}_{k+1} h_n + Q_n - h_n (\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1})}{M_n} \right] + v_n \cdot \frac{dp}{dt} \dots (3.1.9)$$

también la masa se puede expresar de la siguiente forma:

$$M_n = \frac{V_n}{v_n} \dots (3.1.10)$$

la ecuación 3.1.10 se sustituye en la 3.1.9, para obtener la siguiente expresión:

$$\frac{dh_n}{dt} = \left[ \dot{m}_k h_{n-1} - \dot{m}_{k+1} h_n + Q_n - h_n (\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}) \right] \cdot \left( \frac{v}{V} \right)_n + v_n \cdot \frac{dp}{dt} \quad \dots \quad (3.1.11)$$

para simplificar la expresión anterior, se define:

$$C_l = \left[ \dot{m}_k h_{n-1} - \dot{m}_{k+1} h_n + Q_n - h_n (\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}) \right] \cdot \left( \frac{v}{V} \right)_n \quad \dots \dots \dots (3.1.12)$$

así se obtiene finalmente la siguiente ecuación:

$$\frac{dh_n}{dt} = C_l + v_n \cdot \frac{dp}{dt} = C_l + \frac{l}{\rho_n} \cdot \frac{dp}{dt} \quad \dots \dots \dots (3.1.13)$$

por otra parte, la ecuación 3.1.1 se puede expresar en términos de densidad de la siguiente manera:

$$\frac{dM_n}{dt} = \frac{d(V \cdot \rho)_n}{dt} = \frac{V_n \cdot d\rho_n}{dt} \quad \dots \dots \dots (3.1.14)$$

al igualar la ecuación 3.1.14 con la 3.1.1 y despejando dp/dt, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}}{V_n} \quad \dots \dots \dots (3.1.15)$$

también la densidad p es una función de p y h, por lo que al desarrollar una expresión en términos de derivadas parciales, se obtiene lo siguiente:

siendo  $\rho=f(\rho,h)$ , la derivada parcial de dp/dt es:

$$\frac{dp}{dt} = \left( \frac{\partial p}{\partial p} \right) \cdot \frac{dp}{dt} + \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right) \cdot \frac{dh_n}{dt} \dots\dots\dots (3.1.16)$$

al sustituir la ecuación 3.1.13 en la 3.1.16, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{dp}{dt} = \left( \frac{\partial p}{\partial p} \right) \cdot \frac{dp}{dt} + \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right) \cdot \left( C_i + v_n \frac{dp}{dt} \right) \dots\dots\dots (3.1.17)$$

al igualar las ecuaciones 3.1.15 y 3.1.17 y al despejar dp/dt, se obtiene finalmente la siguiente ecuación:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\left[ \left( \dot{m}_k - \dot{m}_{k+i} \right) - V_n \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right) \cdot C_i \right]}{V_n \cdot \left[ \left( \frac{\partial p}{\partial p} \right) + v_n \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right) \right]} \dots\dots\dots (3.1.18)$$

Las ecuaciones 3.1.12, 3.1.13 y 3.1.18 son las deducciones finales, las cuales son la parte medular del programa. Como se puede observar, las ecuaciones obtenidas, se encuentran escritas como una función de la entalpía y presión, debido a que es una forma rápida, por parte del programa EQFASES, de calcular las propiedades termodinámicas de equilibrio.

### 3.2 Modelado de flujo en la ruptura

El modelo de flujo en la ruptura es utilizado para predecir la velocidad del flujo másico que sale de la tubería. Tanto el flujo subsónico como el estrangulado se calculan en la ruptura. Se considera que durante la descarga a través de una ruptura completa el flujo sufre una expansión isoentrópica con velocidades y temperaturas iguales.

Para determinar el flujo estrangulado en la ruptura se utiliza el método extendido de predicción de flujo crítico bifásico propuesto por Starkman y colaboradores [1964]. El procedimiento de cálculo se basa en encontrar la velocidad másica máxima por medio de la variación de la presión estática en el plano de la descarga:

$$G = [2(h_0 - h)]^{1/2} / v \quad \dots\dots\dots (3.2.1)$$

donde la entalpía y el volumen específico se expresan en términos de la presión estática, calidad y composición de la mezcla total.

$$h = h_f(p, z) + xh_{fg}(p, z) \quad \dots\dots\dots (3.2.2)$$

$$v = v_f(p, z) + xv_{fg}(p, z) \quad \dots\dots\dots (3.2.3)$$

la calidad es determinada a lo largo de toda la tubería a entropía constante:

$$x = \frac{S_0 - S_f(p, z)}{S_{fg}(p, z)} \quad \dots\dots\dots (3.2.4)$$

Si el flujo descargado (fugado) de la tubería es subsónico, la presión estática en el plano de la descarga es igual a la presión atmosférica, y la velocidad másica es calculada de la ecuación 3.2.1. Para una despresurización de una tubería a través de una ruptura parcial, la velocidad másica es multiplicada por un coeficiente de descarga  $C_d$  (coeficiente de orificio), para tomar en cuenta la fricción en el extremo roto de la tubería.

### 3.3 Modelo de transferencia de calor

En este inciso se describe brevemente la deducción matemática que se desarrolló en la obtención del modelo de transferencia de calor.

Se hicieron las siguientes simplificaciones en el análisis del modelado de transferencia de calor en la tubería:

- 1) El fluido y la pared de la tubería están en equilibrio térmico local.
  - La resistencia térmica del flujo bifásico es pequeña, en otras palabras, el flujo bifásico se caracteriza por altos coeficientes de transferencia de calor ( $10^3 \dots 10^4$  w/m<sup>2</sup>K), por lo tanto, la temperatura de la superficie interna de la tubería es muy cercana a la temperatura del fluido local.
  - Durante el proceso de descarga de una línea larga existe el tiempo suficiente para que la pared interna de la tubería entre en equilibrio térmico con el fluido.
  
- 2) La transferencia de calor por conducción en la pared de la tubería es despreciada. Los gradientes térmicos en dirección axial en la pared de la tubería son insignificantes (despreciables), en comparación con los gradientes en dirección radial.

La pared de la tubería se dividió en segmentos isotérmicos, como se observa la Figura 3.2.

Para el desarrollo del modelo de transferencia de calor se utilizaron dos ecuaciones básicas, tanto la de conservación de masa como la de energía.

Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{dM_n}{dt} = \dot{m}_k - \dot{m}_{k+1} \dots \dots \dots (3.3.1)$$

Ecuación general de energía:

$$\frac{d}{dt} \cdot (U_n + U_w) = \dot{m}_k h_{n-1} - \dot{m}_{k+1} h_n + Q_n \dots\dots\dots (3.3.2)$$

al desarrollar el término izquierdo de la ecuación 3.3.2 se obtiene lo siguiente:

$$\frac{d}{dt} \cdot (U_n + U_w) = \frac{dU_n}{dt} + \frac{dU_w}{dt} \dots\dots\dots (3.3.3)$$

donde:

$$U_n = M_n u \dots\dots\dots (3.3.4)$$

$$u = h - pv \dots\dots\dots (3.3.5)$$

para desarrollar el primer término de la ecuación 3.3.3., se sustituyen las ecuaciones 3.3.4 y 3.3.5 en él, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\frac{dU_n}{dt} = \frac{d[M_n(h - pv)_n]}{dt} \dots\dots\dots (3.3.6)$$

al desarrollar el término derecho de la ecuación 3.3.6, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dU_n}{dt} = M_n \cdot \frac{d(h - pv)_n}{dt} + (h - pv)_n \cdot \frac{dM_n}{dt}$$

$$\frac{dU_n}{dt} = M_n \cdot \frac{dh_n}{dt} - M_n p \cdot \frac{dv_n}{dt} - M_n v_n \cdot \frac{dp}{dt} + (h - pv)_n \cdot (\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}) \dots\dots (3.3.7)$$

por otro lado, la densidad puede expresarse de la siguiente forma:

$$\frac{dv_n}{dt} = -\frac{v_n}{M_n} \cdot \frac{dM_n}{dt} \dots\dots\dots (3.3.8)$$

al sustituir la ecuación 3.3.8 en la 3.3.7 y simplificando algunos términos se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dU_n}{dt} = M_n \cdot \frac{dh_n}{dt} - M_n v_n \cdot \frac{dp}{dt} + h_n \cdot (\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}) \dots\dots\dots (3.3.9)$$

el segundo término de la ecuación 3.3.3 se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{dU_w}{dt} = M_w c_w \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right) \cdot \frac{dp}{dt} \dots\dots\dots (3.3.10)$$

ahora, al sustituir las ecuaciones 3.3.10 y 3.3.9 en la 3.3.3, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{d}{dt} \cdot (U_n + U_w) = M_n \cdot \frac{dh_n}{dt} - M_n v_n \cdot \frac{dp}{dt} + h_n \cdot (\dot{m}_k + \dot{m}_{k+1}) + M_w c_w \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right) \cdot \frac{dp}{dt} \dots\dots\dots (3.3.11)$$

la ecuación 3.11 se sustituye en la 3.2 y se despeja en términos de dh/dt:

$$\frac{dh_n}{dt} = \frac{\dot{m}_k h_{n-1} - \dot{m}_{k+1} h_n + Q_n - h_n \cdot (\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}) - \left[ M_w c_w \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right) - M_n v_n \right] \cdot \frac{dp}{dt}}{M_n} \dots\dots\dots (3.3.12)$$

también la masa se puede expresar de la siguiente forma:

$$M_n = \frac{V_n}{v_n} \dots\dots\dots (3.3.13)$$

al sustituir la ecuación 3.3.13 en la 3.3.12 y al simplificar la expresión, se define:

$$C_t = \left[ \dot{m}_k h_{n-1} - \dot{m}_{k+1} h_n + Q_n - h_n \cdot \left( \dot{m}_k - \dot{m}_{k+1} \right) \right] \cdot \left( \frac{v}{V} \right)_n \dots\dots\dots (3.3.14)$$

así, se obtiene finalmente la siguiente ecuación:

$$\frac{dh}{dt} = C_t + \left[ v_n - M_w c_w \cdot \left( \frac{v}{V} \right)_n \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right) \right] \cdot \frac{dp}{dt} \dots\dots\dots (3.3.15)$$

por otra parte, la ecuación 3.3.1 se puede expresar en términos de densidad de la siguiente manera:

$$\frac{dM_n}{dt} = \frac{d(V \cdot \rho)}{dt} = V_n \cdot \frac{d\rho}{dt} \dots\dots\dots (3.3.16)$$

al igualar la ecuación 3.3.16 con la 3.3.1 y al despejar dp/dt, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}}{V_n} \dots\dots\dots (3.3.17)$$

la densidad ρ es una función de p y h, por lo que al desarrollar una expresión en términos de derivadas parciales, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dp}{dt} = \left( \frac{\partial p}{\partial P} \right) \cdot \frac{dP}{dt} + \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right) \cdot \frac{dh}{dt} \dots\dots\dots (3.3.18)$$

al sustituir la ecuación 3.3.15 en la 3.3.18, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dp}{dt} = \left( \frac{\partial p}{\partial P} \right) \cdot \frac{dP}{dt} + \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right) \cdot \left\{ Cl + \left[ v_n - M_w c_w \cdot \left( \frac{v}{V} \right)_n \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right) \right] \cdot \frac{dp}{dt} \right\} \dots\dots (3.3.19)$$

al igualar las ecuaciones 3.3.19 y 3.3.17, y al despejar dp/dt, se obtiene finalmente la siguiente ecuación:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\left[ \left( \frac{\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}}{V_n} \right) - \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right) \cdot Cl \right]}{\left\{ \left( \frac{\partial p}{\partial P} \right) + \left[ v_n - M_w c_w \cdot \left( \frac{v}{V} \right)_n \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right) \right] \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right) \right\}} \dots\dots\dots (3.3.20)$$

El flujo externo de calor es evaluado utilizando la ley de enfriamiento de Newton:

$$Q_n = A \cdot h_n \cdot (T_\infty - T_n) \dots\dots\dots (3.3.21)$$

**3.4 Método de solución**

El sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias representadas por las ecuaciones de conservación de masa y energía pueden escribirse en un vector de la forma:

$$\frac{dy}{dt} = F(t, Y) \dots\dots\dots (3.4.1)$$

donde:

$$Y = \left[ M_1, M_2, \dots, M_n, P_1, P_2, \dots, P_n, \dot{m}_1, \dot{m}_2, \dots, \dot{m}_k \right]^T \dots\dots\dots (3.4.2)$$

El sistema precedido de las ecuaciones diferenciales ordinarias con las condiciones iniciales y de frontera discutidas anteriormente fue resuelto por el método de Gear (1971). El método se basa en remplazar el sistema de ecuaciones diferenciales con un sistema de ecuaciones en diferencias finitas. Las cantidades escalares (presión, densidad, entalpía) se obtienen en los centros de las celdas (nodo, n), mientras que las cantidades vectoriales se definen en las fronteras de las celdas (unión, k), como se puede observar en la Figura 3.2.

**3.5 Modelo considerando la energía cinética**

En este inciso se anexa el efecto de la energía cinética del fluido al modelo hidrodinámico.

De la misma forma que en el inciso 3.3, se utilizó las dos ecuaciones básicas, tanto la de conservación de masa como la de energía y en ésta última se incluye el término de la energía cinética.

Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{dM_n}{dt} = \dot{m}_k - \dot{m}_{k+1} \dots \dots \dots (3.5.1)$$

Balance de Energía:

$$\frac{d}{dt} \left( U_n + M_n \frac{W^2}{2} + U_w \right) = \dot{m}_k \left( h + \frac{W^2}{2} \right)_{n-1} - \dot{m}_{k+1} \left( h + \frac{W^2}{2} \right)_n + Q_n \dots (3.5.2)$$

al desarrollar el término izquierdo de la ecuación 3.5.2 se obtiene lo siguiente:

$$\frac{d}{dt} \left( U_n + M_n \frac{W^2}{2} + U_w \right) = \frac{dU_n}{dt} + \frac{d}{dt} \left( M_n \frac{W^2}{2} \right) + \frac{dU_w}{dt} \dots \dots \dots (3.5.3)$$

del incisos anterior 3.3, se tiene definida la energía interna así:

$$\frac{dU_n}{dt} = M_n \cdot \frac{dh}{dt} - M_n v_n \cdot \frac{dp}{dt} + h_n \left( \dot{m}_k - \dot{m}_{k+1} \right) \dots \dots \dots (3.5.4)$$

$$\frac{dU_w}{dt} = M_w c_w \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right) \frac{dp}{dt} \dots\dots\dots (3.5.5)$$

por lo que sólo resta deducir el término de la energía cinética de la ecuación 3.5.3, la cual se desarrolla de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt} \left( M_n \frac{W^2}{2} \right) = M_n \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{W^2}{2} \right) + \frac{W^2}{2} \cdot \frac{dM_n}{dt} \dots\dots\dots (3.5.6)$$

al desarrollar el primer término del lado derecho de la ecuación 3.5.6, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{W^2}{2} \right) = W \cdot \frac{dW}{dt} \dots\dots\dots (3.5.7)$$

la velocidad se puede definir de la siguiente forma:

$$W = \frac{\dot{m}_n v_n}{A} \dots\dots\dots (3.5.8)$$

por lo que, al sustituir la ecuación 3.5.8 en la 3.5.7, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{W^2}{2} \right) = W \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{\dot{m}_n v_n}{A} \right) \dots\dots\dots (3.5.9)$$

se supone que tanto  $v_n$  y  $A$  son constantes, por lo tanto la ecuación 3.5.9 se convierte en la siguiente expresión:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{W^2}{2} \right) = W \cdot \frac{v_n}{A} \cdot \frac{dm_n}{dt} \dots\dots\dots (3.5.10)$$

donde:

$$\dot{m}_n = \frac{\dot{m}_k + \dot{m}_{k+1}}{2} \dots\dots\dots (3.5.11)$$

al sustituir las ecuaciones 3.5.1, 3.5.10 y 3.5.11 en la ecuación 3.5.6 se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{d}{dt} \left( M_n \cdot \frac{W^2}{2} \right) = M_n W \cdot \frac{v_n}{A} \cdot \frac{dm_n}{dt} + \frac{W^2}{2} \cdot (\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}) \dots\dots\dots (3.5.12)$$

ahora, al sustituir las ecuaciones 3.5.4, 3.5.5 y 3.5.13 en la 3.5.2 y al despejar la expresión en términos de dh/dt, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{dh_h}{dt} = \frac{\dot{m}_k \cdot \left( h + \frac{W^2}{2} \right)_{n-1} - \dot{m}_{k+1} \cdot \left( h + \frac{W^2}{2} \right)_n + Q_n - \left( h + \frac{W^2}{2} \right)_n \cdot (\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}) - \left[ M_n c_w \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial \alpha} \right) - M_n v_n \right] \cdot \frac{dp}{dt} - \left( MW \cdot \frac{v}{A} \right)_n \cdot \frac{dm_n}{dt}}{M_n} \dots\dots\dots (3.5.13)$$

para simplificar la expresión anterior, se define:

$$C_t = \left[ \dot{m}_k \cdot \left( h + \frac{W^2}{2} \right)_{n-1} - \dot{m}_{k+1} \cdot \left( h + \frac{W^2}{2} \right)_n + Q_n - \left( h + \frac{W^2}{2} \right)_n \cdot (\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}) \right] \cdot \left( \frac{v}{V} \right)_n \dots\dots\dots (3.5.14)$$

por lo que se obtiene finalmente la siguiente ecuación:

$$\frac{dh_n}{dt} = C_l - \left[ M_n c_w \cdot \left( \frac{v}{V} \right)_n \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right) - v_n \right] \cdot \frac{dp}{dt} - \left( W \frac{v}{A} \right)_n \cdot \frac{d\dot{m}_n}{dt} \dots\dots\dots (3.5.15)$$

por otra parte, la ecuación 3.5.1 se puede expresar en términos de densidad de la siguiente manera:

$$\frac{dM_n}{dt} = \frac{d(V \cdot \rho)}{dt} = V_n \cdot \frac{d\rho}{dt} \dots\dots\dots (3.5.16)$$

al igualar la ecuación 3.5.16 con la 3.5.1 y al despejar dp/dt, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}}{V_n} \dots\dots\dots (3.5.17)$$

la densidad ρ es una función de p y h, por lo que al desarrollar una expresión en términos de derivadas parciales, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{d\rho}{dt} = \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right) \cdot \frac{dP}{dt} + \left( \frac{\partial \rho}{\partial h} \right) \cdot \frac{dh}{dt} \dots\dots\dots (3.5.18)$$

al igualar las ecuaciones 3.5.17 y 3.5.18, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}}{V_n} = \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right) \cdot \frac{dP}{dt} + \left( \frac{\partial \rho}{\partial h} \right) \cdot \frac{dh}{dt} \dots\dots\dots (3.5.19)$$

al sustituir la ecuación 3.5.15 en la ecuación 3.5.19 y al despejar dp/dt, se obtiene finalmente la siguiente ecuación:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\left[ \left( \frac{\dot{m}_k - \dot{m}_{k+1}}{V_n} \right) - \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right) \cdot C_l + \left( \frac{W \cdot v}{A} \right)_n \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right) \cdot \frac{d \dot{m}_n}{dt} \right]}{\left\{ \left( \frac{\partial p}{\partial p} \right) - \left[ M_w c_w \cdot \left( \frac{v}{V} \right)_n \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right) - v_n \right] \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right) \right\}} \dots\dots\dots (3.5.20)$$

La expresión anterior se encuentra escrita como una función de la entalpía y presión, considerando como ya se mencionó al inicio de este inciso, el efecto de la energía interna. Esta ecuación (3.5.20) se utiliza en el programa para simular los ejemplos del capítulo de aplicaciones donde se permite observar el efecto de la energía cinética, debido a que se ejemplifican líneas largas.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

## VALIDACIÓN DEL MODELO

Después de haber desarrollado el modelado numérico, el cual permite conocer el comportamiento de una descarga, el siguiente paso es validarlo, por lo que en este capítulo, se describe en primer lugar el experimento que se ha desarrollado más completo hasta el momento sobre la descarga de un ducto que transporta un líquido volátil y que haya sido publicado; en segundo lugar, se presentan las características del sistema que se planteó para poder reproducir el experimento y simularlo y finalmente, se muestran los resultados gráficos que validan el modelo.

### 4.1 Descripción del experimento

Muy pocos datos experimentales o bases de datos existen para flujo bifásico multicomponente transiente, debido a que, el realizar un estudio de descarga de ductos resulta:

- 1) Muy costoso, porque el fluido de estudio se perdería en un 100 % en cada experimento.
- 2) Muy peligroso, porque se manejan líquidos volátiles con un índice alto de explosividad.
- 3) Muy contaminante, porque todo el fluido se descargaría a la atmósfera.

Por otra parte, en los lamentables accidentes de descarga de ductos, no se tiene información alguna de datos, y la que se pudiese tener, es restringida por parte de la compañía involucrada.

Este estudio se basa en los datos de un experimento, considerado como uno de los más completos, el cual se realizó en Inglaterra en el año de 1988 y a continuación se describe los detalles más importantes para el caso de interés de este trabajo.

Las compañías British Petroleum y Shell Oil llevaron a cabo en el año de 1988 una serie de experimentos en la isla de Grain, Inglaterra, con el fin de observar el comportamiento de la descarga de un ducto conteniendo un líquido volátil, estos experimentos fueron conducidos por Tam & Cowley [1988], los cuales fueron muy extensos y contienen no únicamente mediciones transientes locales, sino además se evalúa la dispersión del chorro fugado de la tubería.

El fluido de prueba para estos experimentos fue gas LPG presurizado con una composición de 95 % en mol de propano y 5 % en mol de n-butano, se utilizó 2 tuberías de acero comercial (con rugosidad característica) horizontales de 100 m de longitud de 0.05 m y 0.15 m de diámetro respectivamente. Las pruebas de presión varían de 8 a 21 bares y la temperatura es la ambiental, variando entre 15 y 20 °C. La presión de saturación de la mezcla a estas temperaturas es aproximadamente 8 bar.

Inicialmente se carga la línea con LPG presurizado, uno de los extremos de la tubería permanece cerrado, el otro es roto. La ruptura de la tubería se simuló por la ruptura de un diafragma de vidrio, instalado en el extremo de la descarga de la tubería. El tamaño del orificio es controlado con una placa de orificio, y varía desde una ruptura total ( $d_{ruptura} = d_{tubería}$ ), hasta un orificio de 0.05 m de diámetro, en el caso de la tubería de diámetro de 0.15 m de diámetro, que es la que se utilizó para validar el modelo propuesto en este trabajo. En la descripción del experimento no se menciona el mecanismo que se utilizó para romper el diafragma, pero sí se menciona que la ruptura se realizó rápidamente y no tiene obstrucciones. Se colocaron celdas cada 5 m en toda la tubería de prueba con el fin de medir la variación de la masa durante la descarga.

La temperatura y presión del fluido se midieron por 10 termopares y 10 sensores de presión. La fracción de vacío se midió utilizando celdas de carga colocadas en la tubería.

En la Figura 4.1 se presenta la vista de planta del sistema de experimentación que se utilizó.

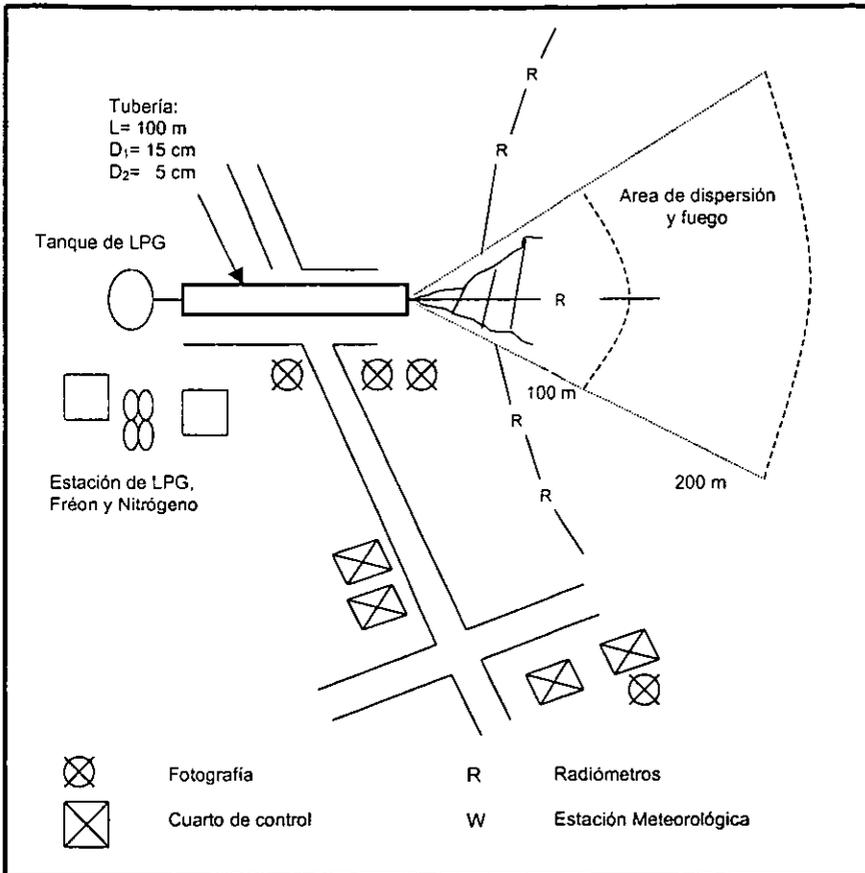


Figura 4.1 Vista de planta del sistema de experimentación

## 4.2 Validación del modelo

En este trabajo los resultados del experimento que realizaron Tam & Cowley para una tubería horizontal de 100 m de longitud y 0.15 m de diámetro con ruptura completa fueron utilizados para validar el modelo propuesto. Se utilizaron los datos medidos de masa, presión, temperatura y fracción de vacío para compararlos con los calculados tanto en el extremo roto como en el intacto.

Las características del sistema que se planteó para que el programa ejemplificara el experimento de Tam & Cowley se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Características de la tubería experimental

Sistema	Horizontal.
Longitud	100 m.
Diámetro	0.15 m.
Rugosidad	0.05 m.
Extremo roto	Ruptura total
Composición del Fluido de prueba (gas LPG)	95 % en mol de Propano y 5 % en mol de n-Butano
Presión de prueba	8.5 bares.
Temperatura de prueba	20 °C.

Los cálculos se desarrollaron sobre una estación de trabajo HP Apollo serie 700 utilizando un código FORTRAN-77 de doble precisión, dicho código permitirá su manejo en PC, así como la integración en una interfase para un uso más amigable del programa.

Los resultados predichos por el programa para la variación de la masa total del fluido durante todo el proceso de descarga, como puede observarse en la Figura 4.2, presentan un comportamiento similar con los valores medidos experimentalmente.

En las pruebas experimentales, el sistema estaba presurizado, por lo que, el modelo desarrollado en este trabajo, no predice la presión de sobredisparo en el inicio de la descarga, debido a que la etapa de propagación de la onda de depresurización no es simulada, el tiempo de este proceso es demasiado corto ( $<1$  segundo). Se consideró que las caídas de presión alcanzan instantáneamente a la presión de saturación. La Figura 4.3 muestra que el modelo sobrepredice la variación de la caída de presión significativamente en el extremo intacto de la tubería.

Chen y colaboradores [1995 b] también simulan el experimento de Tam & Cowley [1988] para validar su modelo de dos fluidos. Atribuyen que la discrepancia se debe a (1) la incertidumbre en el mecanismo de la ruptura, por ejemplo, algunos obstáculos permanecen en la fuga de la tubería después del rompimiento del diafragma y (2) la incertidumbre en la rugosidad. El análisis anterior indica que esta discrepancia probablemente resulta de una mala estimación de la importancia del efecto de transferencia de calor en el problema considerado. Si el flujo es considerado adiabático, la presión puede ser predecido erróneamente inicialmente significativamente en el extremo intacto (cerrado).

Las consideraciones hechas en la construcción del modelo de transferencia de calor no son válidas para la tubería utilizada (muy corta) en este experimento. El equilibrio entre la pared de la tubería y el fluido no se alcanzó debido a que el tiempo de la descarga también fue muy corto (aproximadamente 25 segundos), como se puede observar en la Figura 4.4.

Existe además un buen acuerdo entre la fracción de vacío medida y estimada en el extremo abierto (roto), como se puede observar en la Figura 4.5. El modelo sobrestimó la variación de la generación de vapor durante los primeros segundos del proceso de evaporación en el extremo cerrado de la tubería. Esta discrepancia se atribuye a los efectos de desequilibrio térmico. El modelo de equilibrio homogéneo predice la máxima variación de generación posible de vapor que es siempre mayor que la que se produce a tiempos muy tempranos. De cualquier forma, para descargas de tuberías largas con un L/D del orden de  $10^4 - 10^5$ , el tiempo de descarga debe ser mayor, y los efectos de no-equilibrio térmico deben ser menos significantes.

De acuerdo a los anteriores comentarios sobre los resultados obtenidos de la simulación de una fuga (descarga), se considera que el programa está Validado.

Las ecuaciones 3.1.12, 3.1.13 y 3.1.18 (capítulo 3) se utilizaron para validar el programa, las cuales no toman en cuenta la energía cinética del fluido, ni la capacidad térmica de la tubería, como ya se mencionó anteriormente, por ser un sistema muy corto. La variación de lo medido contra lo calculado para la masa, presión, temperatura y fracción de vacío tanto en el extremo roto como en el intacto de la tubería se muestra en las Figuras 4.2-4.5 respectivamente.

Cada corrida requirió de 30 minutos aproximadamente. El tiempo principal de máquina fue gastado en los cálculos termodinámicos y de equilibrio de fases. La simulación para propano puro toman menos de 20 minutos.

Es bueno hacer notar que este trabajo es uno de los más recientes y completo, con respecto a los trabajos previos desarrollados por otros investigadores, aun más, sus resultados podrá compararse y/o competir con simuladores comerciales que existen en el mercado actualmente, básicamente por sus resultados que han sido validados además de las consideraciones ya mencionadas anteriormente.

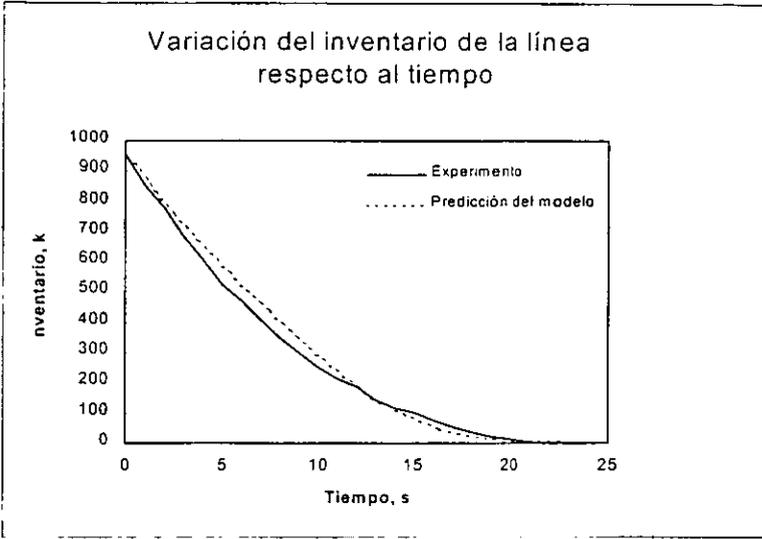


Figura 4.2

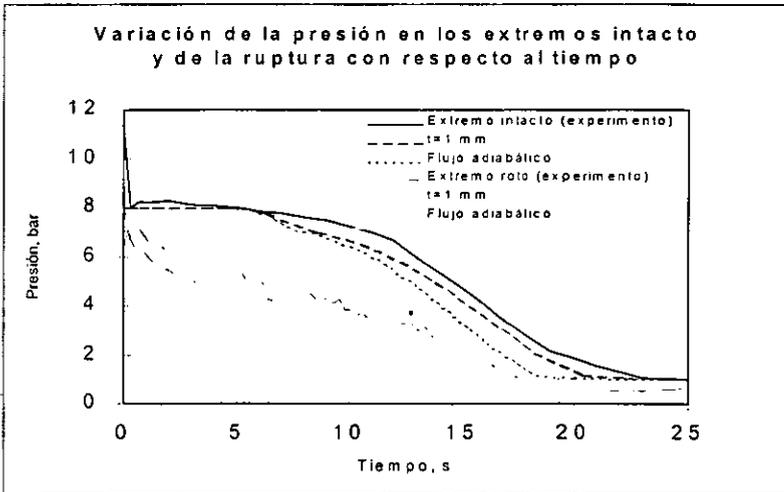


Figura 4.3

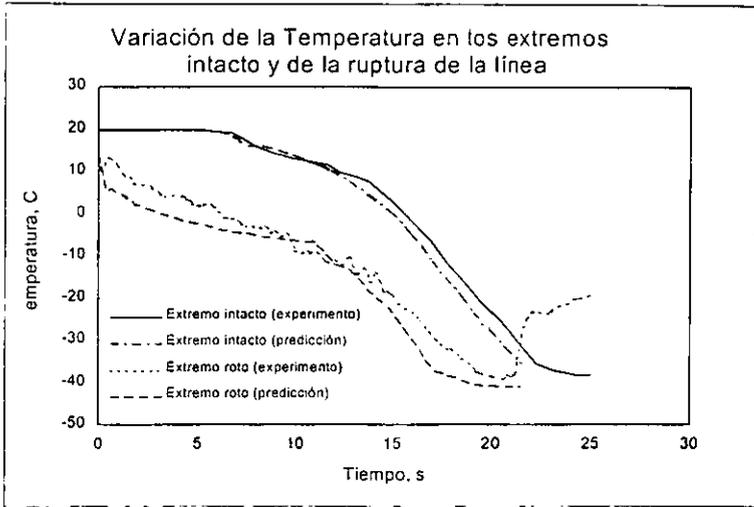


Figura 4.4

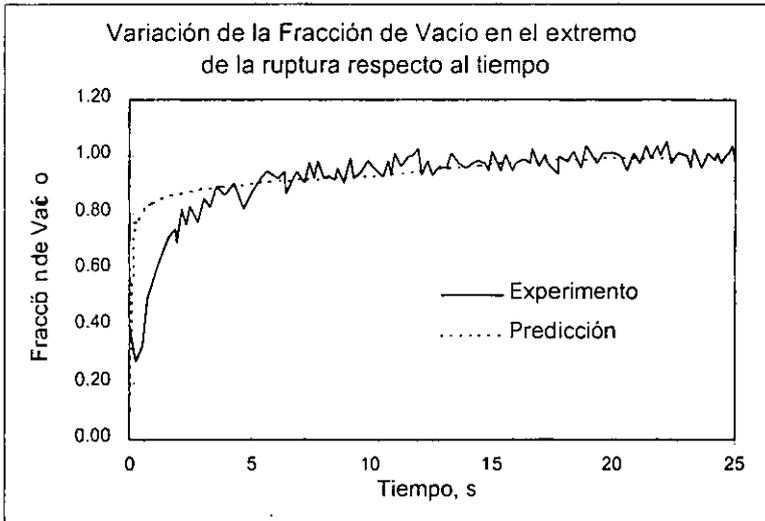


Figura 4.5

## APLICACIONES

El programa de computadora que se desarrolló en este trabajo permite predecir el comportamiento del flujo durante la descarga de un ducto que transporta un líquido volátil, tomando en cuenta los efectos térmicos del ducto y de los alrededores. Se modelaron dos situaciones:

- 1) Descarga al final de la línea.
- 2) Descarga en un punto arbitrario de la línea (exceptuando los extremos).

Las dos situaciones de simulación aplican únicamente para sistemas horizontales estancados, en otras palabras, considera que al instante en que se da la descarga de un ducto, el sistema es aislado completamente, ya sea que las válvulas de corte actúan inmediatamente o que el sistema de bombeo del fluido (o de compresión) se apaga automáticamente.

Después de que el programa ya ha sido validado (capítulo anterior), el siguiente paso es extender sus aplicaciones. En primer lugar se simularán líneas largas con descarga en un extremo, tanto para gas LPG como para condensados y el segundo caso, la simulación de líneas largas pero con rupturas arbitrarias, utilizando solo el gas LPG como fluido de prueba.

El modelo permite calcular durante todo el proceso:

- La variación de presión en cualquier punto de la línea.
- La variación de temperatura en cualquier punto de la línea.
- La variación del flujo en cualquier punto de la línea.
- La variación de la fracción de vacío cualquier punto de la línea.
- La variación de la calidad en cualquier punto de la línea.
- La cantidad de la masa fugada.

Así, el poder visualizar las variaciones de estos parámetros, permitirá:

- 1) Comprender el fenómeno de la descarga.
- 2) Poder evaluarlo y cuantificarlo.
- 3) Plantear estrategias de acción.
- 4) Disminuir riesgos.

### 5.1 Línea larga con descarga en un extremo

Para poder comprender y evaluar mejor esta aplicación se plantea un problema, que como ejemplo, se analicen los resultados y así poder crear criterios de acción o decisión. El proponer un ejemplo como caso de estudio, se debe a que no se cuentan con datos experimentales para líneas largas, como se mencionó con anterioridad.

Los resultados de los ejemplos propuestos se realizaron utilizando las ecuaciones (3.3.14), (3.3.15), (3.3.20) y (3.3.21), en las cuales se toma en cuenta los efectos de la capacidad térmica de la tubería, la transferencia de calor de los alrededores y la energía cinética.

Como Ejemplo 1 se simula el oleogasoducto Paredón-Cactus (ver Figura 5.1), tiene una distancia de 22 km, y un diámetro de 36 pulgadas, en el cual se transporta gas LPG comercial.

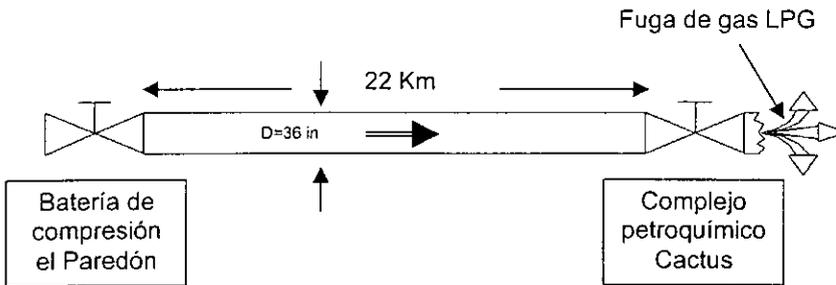


Figura 5.1 Esquema simplificado de la línea Paredón - Cactus

El propósito de este ejemplo, es simular y evaluar el comportamiento de una línea larga con descarga en un extremo.

Para realizar esta tarea con el simulador "DESCARGA" (nombre que se le asigno al programa desarrollado), es necesario en primer lugar, identificar las características necesarias del sistema, las cuales se describen en la Tabla 5.1, posteriormente se determina los parámetros necesarios para el simulador que describen la ubicación y tipo de ruptura, en la Tabla 5.2 se pueden observar tales parámetros.

Tabla 5.1 Características de la línea  
Paredón - Cactus

Longitud	22,000 m (horizontal)
Diámetro	0.9144 m
Fluido	Gas LPG
Composición	95 % propano, 5 % n-butano
Sitio de ruptura	En un extremo
Tipo de ruptura	Total

Tabla 5.2 Características de la ruptura

Numero de nodos	20
Malla uniforme (PWRZ)	1
Nodo de ruptura	20
Ruptura total (ALFA)	1

En el Anexo II, Manual de operación del simulador, se describe brevemente la forma de introducir los datos, así como, la forma en que el programa despliega los resultados en los archivos de salida.

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron con las variables de mayor interés, y así poder analizar y evaluar este evento:

El tiempo de cálculo de este problema fue de 30 minutos aproximadamente. Como se puede observar en la Figura 5.2, el proceso tiene una duración de 13550 segundos (3 horas y 45 minutos), restando un 5% de la masa total del fluido en el interior del ducto. La masa total que se descarga es de 7,237,000 kg. esto es aproximadamente  $14,400 \text{ m}^3$  de gas LPG ( $\rho \cong 502 \text{ kg/m}^3$ ). En la Figura 5.3, los flujos más altos se tienen en los primeros 35 segundos del proceso, en los 3 minutos siguientes se tienen flujos moderados, hasta llegar a tener flujos muy bajos, que son los que predominan durante casi todo el proceso de descarga. La presión en el extremo roto disminuye muy rápidamente, mientras que en el extremo intacto, hasta los 25 minutos aproximadamente del proceso de descarga, empieza a disminuir la presión (ver la Figura 5.4).

En la Figura 5.5, se observa el comportamiento de la temperatura del sistema. Lo que es importante hacer notar, es que, a los 5 minutos aproximadamente del proceso de descarga, se alcanza en el extremo roto una temperatura de  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura de sedencia (ASME B31.4) del acero comercial (material de fabricación de algunos ductos de transporte).

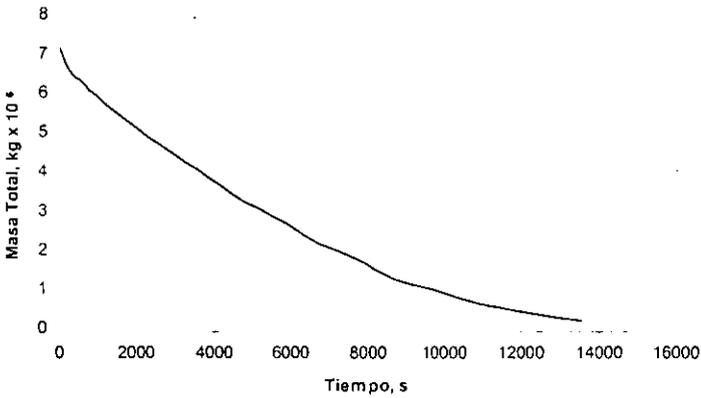


Figura 5.2 Variación de la masa total en el ducto

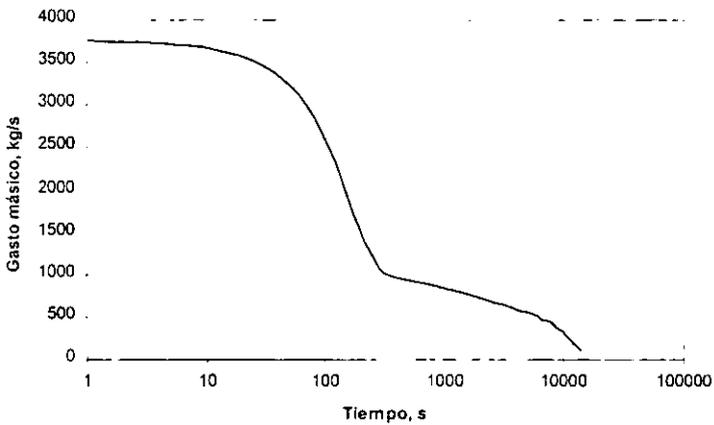


Figura 5.3 Variación del gasto másico en la ruptura

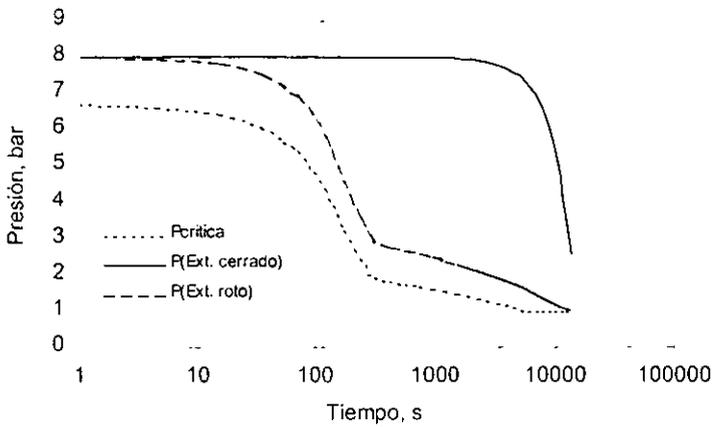


Figura 5.4 Variación de la presión en los extremos

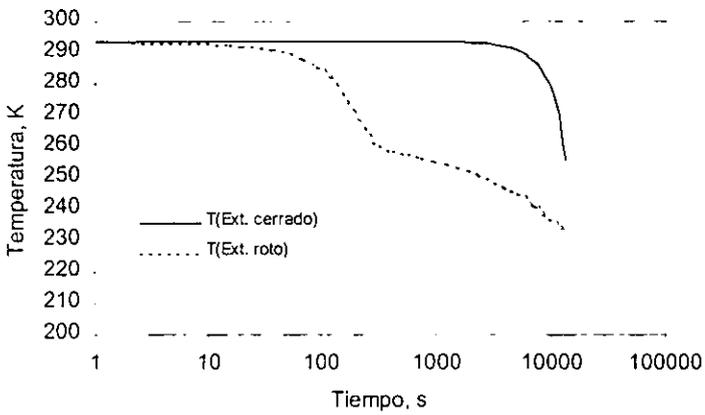


Figura 5.5 Variación de la temperatura en los extremos

Después de haber analizado los resultados del Ejemplo 1 se plantean dos preguntas, las cuales permitirán observar aun con más detenimiento las posibles aplicaciones del simulador.

- a) Un operador trata de cerrar la válvula que se encuentra ubicada en Cactus (ver Figura 5.1). ¿La acción del operador es la correcta?
- b) ¿Qué alternativas tiene el operador para actuar además de intentar cerrar la válvula?

La respuesta de la primera pregunta de este ejemplo, sin tomar en cuenta un riguroso estudio de análisis estructural del ducto, es la siguiente:

- Si el operador por algún motivo acciona la válvula de corte después de tres minutos de haber iniciado la fuga, se tendrá una gran posibilidad de que el operador degolle la válvula, debido a que en ese periodo de tiempo la temperatura del nodo de descarga (ubicación de la válvula) alcanza una temperatura mínima (ver Figura 5.5), por lo que se considera una acción de alto riesgo.

Antes de contestar la última pregunta de este ejemplo vale la pena comentar lo siguiente:

- El objetivo de este trabajo es el de describir el comportamiento de una fuga, para que al analizar los resultados se tomen medidas preventivas y correctivas para minimizar los riesgos que originan una fuga de un ducto que transporta un líquido volátil.
- Por otra parte, hace algunos años, el International Risk Institute reconoció que una fuga de grandes cantidades de gases inflamables puede formar una nube explosiva en espacios abiertos, que desgraciadamente puede causar daños no deseados o catastróficos en extensas áreas en el lugar del evento (instalaciones de procesamiento).

- Toda instalación, equipo y sistema son diseñados, especificados y construidos bajo condiciones de seguridad, implementándose la protección adecuada, así como los elementos necesarios para prevenir lesiones y pérdidas humanas, para evitar daños a los equipos, al medio ambiente y áreas circunvecinas de las instalaciones; aun más, para permitir la detección oportuna de riesgos y tomar decisiones de forma segura y confiable. Sin embargo, existe el factor sorpresa, donde nada ni nadie es capaz de asegurar el momento de que se presente un accidente, por lo que la industria en general ha adoptado la posición de crear planes de contingencia en caso de que se presente tal accidente.

Ahora, la respuesta de esta última pregunta, y sin realizar un riguroso estudio de análisis de riesgo, es la siguiente:

- El operador debe apegarse al plan de contingencias existente en su instalación, que consiste básicamente en: aislar la zona afectada y ubicarse en un lugar seguro o de menor riesgo; en caso de producirse alguna explosión o deflagración. El tiempo que tiene el operador para llevar a cabo estas acciones es de suma importancia, y solo podrá obtener esta información confiable haciendo simulaciones de los posibles eventos.

Hoy en día se están tomando medidas que ayuden en la disminución de accidentes, medidas que van desde creación de organismos que normen la seguridad de una instalación, hasta reuniones denominadas mesas redondas donde se le inculca al operador de una instalación el concepto de seguridad.

Como Ejemplo 2, se simuló la descarga de un fluido multicomponente (condensado).

En el distrito Reforma, específicamente, en las instalaciones superficiales del campo de Chiapas, se obtienen condensados del gas de alta presión, los cuales son enviados por un ducto hasta la batería de Giraldas. La línea Chiapas-Giralda tiene una longitud de 15 km, con un diámetro de 10 pulgadas. Suponer que existe una falla en un primer tramo de 5 km de la longitud total de la línea (ver Figura 5.6).

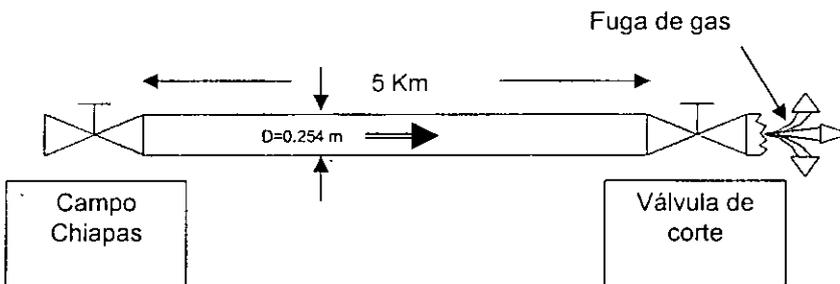


Figura 5.6 Esquema simplificado de la línea Chiapas - Giraldas

El propósito de este ejercicio es similar al Ejemplo 1, simular y evaluar el comportamiento de la descarga de la línea en un extremo, con las variantes de que la línea es más corta y el fluido es un condensado (mezcla multicomponente).

Para realizar esta tarea con el simulador "DESCARGA", en primer lugar se identifican las características necesarias del sistema, las cuales se listan en las Tabla 5.3 y 5.4, posteriormente se determinan los parámetros necesarios que describen la ubicación y tipo de ruptura, los cuales se pueden observar en la Tabla 5.5.

Tabla 5.3 Características de la línea Chiapas - Giraldas

Longitud	5,000 m
Diámetro	0.2540 m
Fluido	Condensado
Sitio de ruptura	En un extremo
Tipo de ruptura	Total

Tabla 5.4 Composición del condensado

COMPUESTO	COMPOSICIÓN, % MOL
Metano	0.04
Etano	0.03
Propano	0.05
n-Butano	0.05
n-Pentano	0.06
Decano	0.53
Eicosano	0.21
Agua	0.03

Tabla 5.5 Características de la ruptura

Numero de nodos	20
Malla uniforme (PWRZ)	1
Nodo de ruptura	20
Ruptura total (ALFA)	1

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron para este caso, se analizan los resultados con las variables de mayor interés, y así, poder evaluar este evento.

El tiempo de calculo fue de 1 hr con 30 minutos aproximadamente para poder evaluar dicho evento, donde la mayor parte de este tiempo se utiliza en el cálculo de propiedades termodinámicas y de equilibrio. Como se puede observar en la Figura 5.7, el proceso tiene una duración de 3,500 segundos (58 minutos), restando un 7% de la masa total del fluido en el interior del ducto. La masa total que se descarga es de 181,300 kg. esto es aproximadamente 250 m<sup>3</sup> de condensado ( $\rho \cong 733 \text{ kg/m}^3$ ). En la Figura 5.8, los flujos más altos se tienen en los primeros 5 segundos del proceso (650 kg/s), en los 2 minutos siguientes se tienen flujos moderados (400 kg/s), hasta llegar a tener flujos muy bajos (60 kg/s), que son los que predominan durante casi todo el proceso de descarga. La presión en el extremo roto disminuye muy rápidamente (primeros 10 segundos), mientras que en el extremo intacto, hasta los 3 minutos aproximadamente del proceso de descarga, empieza a disminuir la presión (ver la Figura 5.9).

En la Figura 5.10, se observa el comportamiento de la temperatura del sistema. En este ejemplo, utilizando un condensado como fluido de prueba, se tiene una disminución de temperatura, siendo esta no tan crítica, a comparación del Ejemplo 1. Se alcanza una temperatura en el extremo roto de 0 °C, casi al final del proceso de descarga. El comportamiento de la fracción de vacío en el extremo roto tiene un incremento casi instantáneo al iniciar el proceso de la descarga, que en comparación con el extremo intacto, el incremento de la fracción de vacío inicia hasta los 2 minutos después de haber iniciado el proceso de descarga, como se puede observar en la Figura 5.11.

Lo relevante de este ejemplo, es que se muestra la habilidad del modelo de poder manejar mezclas multicomponentes, hasta 8 componentes, incluyendo agua como componente de la misma, situación que algunos simuladores comerciales no lo han logrado con éxito, esto resulta ser una gran ventaja de este programa hacia los ya desarrollados, inclusive hacia los simuladores comerciales más cotizados.

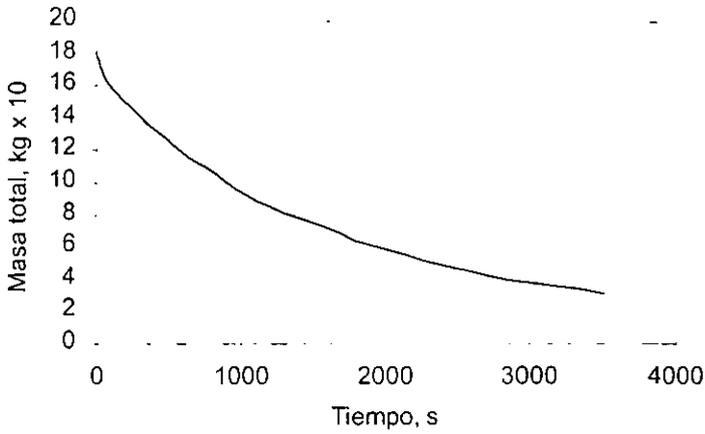


Figura 5.7 Variación de la masa total en el ducto

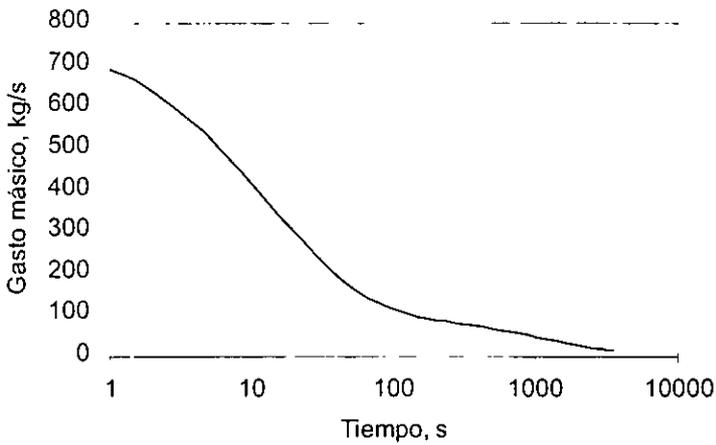


Figura 5.8 Variación del gasto másico en la ruptura

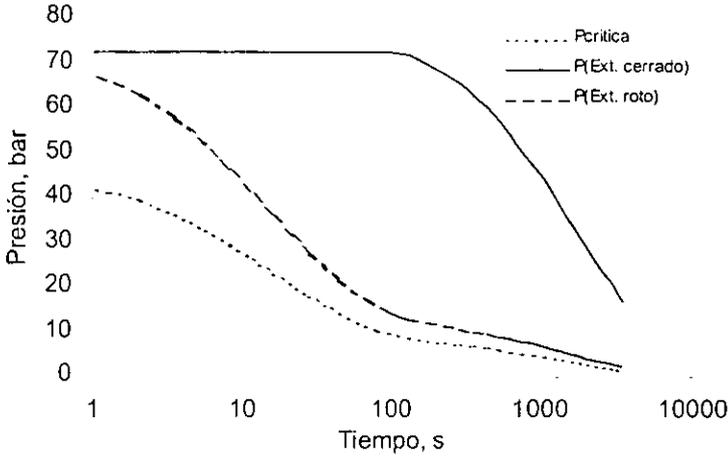


Figura 5.9 Variación de la presión en los extremos

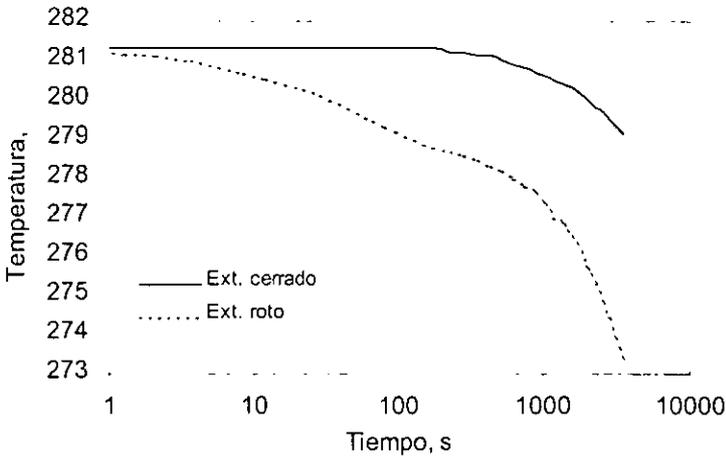


Figura 5.10 Variación de la temperatura en los extremos

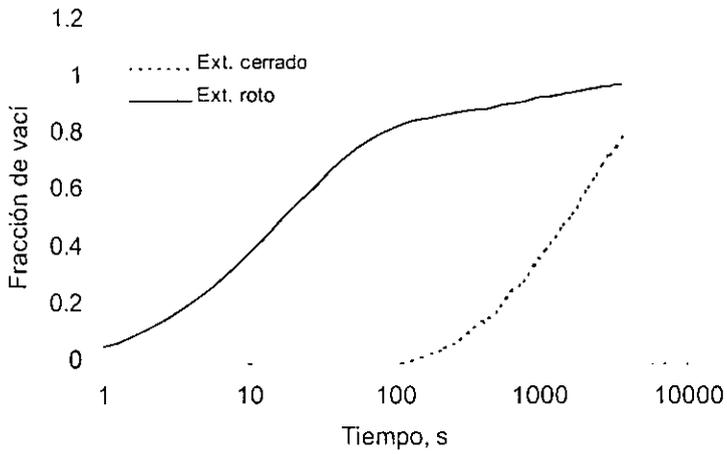


Figura 5.11 Variación de la fracción de vacío en los extremos

## 5.2 Línea larga con descarga arbitraria

El simulador desarrollado en este trabajo, además de evaluar la descarga de un ducto en los extremos, también puede evaluar la descarga en cualquier punto del ducto. Se plantea un ejemplo como ejercicio para comprender y evaluar mejor esta aplicación, y así de una forma muy fácil, poder analizar los resultados y crear criterios de acción y/o decisión. El ejercicio que se plantea es el mismo que se desarrolló en el Ejemplo 1, excepto por la ubicación de la fuga.

Como Ejemplo 3, se simula la descarga del oleogasoducto Paredón-Cactus, tiene una distancia de 22 km, y un diámetro de 36 pulgadas, en el cual se transporta gas LPG comercial. Se hace la suposición de que a 5.5 km después de la batería de compresión el Paredón se presenta una fuga en la línea (ver Figura 5.12).

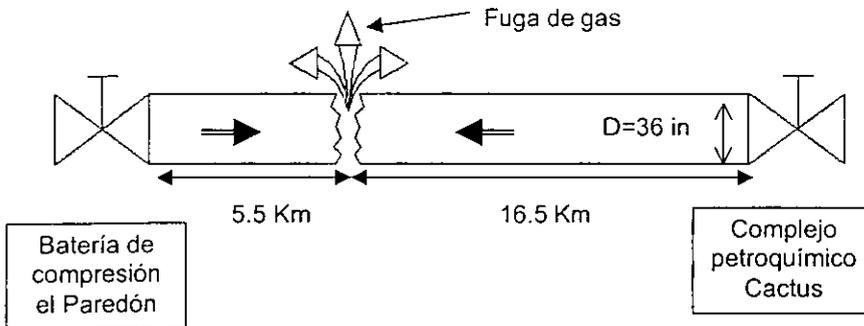


Figura 5.12 Esquema simplificado de la línea Paredón - Cactus

El propósito de este ejemplo, es simular y evaluar el comportamiento de la descarga de una línea larga ubicada en un punto arbitrario de la línea (exceptuando los extremos).

Para realizar esta tarea con el simulador "DESCARGA", es necesario en primer lugar, identificar las características necesarias del sistema, las cuales se describen en la Tabla 5.6, posteriormente se determinan los parámetros necesarios para el simulador, que describen la ubicación y tipo de ruptura. En la Tabla 5.7 se pueden observar tales parámetros.

Tabla 5.6 Características de la línea Paredón - Cactus

Longitud	22,000 m (horizontal)
Diámetro	0.9144 m
Fluido	Gas LPG
Composición	95 % propano, 5 % n-butano
Sitio de ruptura	5.5 km
Tipo de ruptura	Total

Tabla 5.7 Características de la ruptura

Numero de nodos	20
Malla uniforme (PWRZ)	1
Nodo de ruptura	5
Ruptura total (ALFA)	1

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron para este caso:

El tiempo de calculo fue de 35 minutos aproximadamente, para poder evaluar tal evento. Como se puede observar en la Figura 5.13, el proceso tiene una

duración de 7680 segundos (2 horas, 8 minutos), restando un 5% de la masa total del fluido en el interior del ducto. La masa total que se descarga es de 7,237,000 kg. esto es aproximadamente 14,400 m<sup>3</sup> de gas LPG ( $\rho \cong 502 \text{ kg/m}^3$ ), resultando ser la misma cantidad que en el ejemplo 1. Definiendo como tramo 1 a la sección de la tubería corriente arriba de la fuga y como tramo 2 a la sección de la tubería corriente abajo de la fuga (ver Figura 5.12). El tramo 1 se descarga más rápidamente por ser más corta que el tramo 2 (ver Figura 5.14).

Se analizan en este ejemplo los extremos del ducto, el nodo 1 y el nodo 20. Como se puede observar en la Figura 5.15 la presión en el nodo 1 comienza a disminuir después de 4 minutos de haber iniciado la descarga, mientras que en el nodo 20, se presenta la disminución de la presión después de 16 minutos. Se analiza de la misma forma el comportamiento de la temperatura, en la Figura 5.16. Se puede observar que en el nodo 1 se alcanza una temperatura de -20 °C después de 46 minutos aproximadamente de haber iniciado el proceso de la descarga, mientras que en el nodo 20 la temperatura mínima que se logra alcanzar es de -15 °C hasta el final de proceso de descarga.

En la Figura 5.17, los flujos más altos se tienen en los primeros 20 segundos del proceso (3700 kg/s), posteriormente se tiene una disminución exponencial, hasta llegar a flujos muy bajos (700 kg/s).

La característica principal de este ejemplo, es el permitir fácilmente especificar la ubicación de la posición (arbitraria) de la descarga sin mayor problema por parte del modelo, nuevamente, situación que algunos simuladores no han establecido con éxito y lo cual se podría considerar como una ventaja de este trabajo.

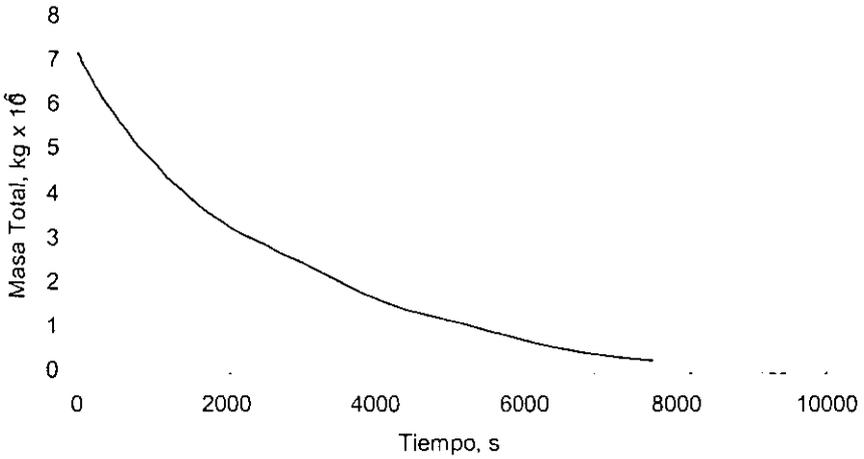


Figura 5.13 Variación de la masa total en el ducto

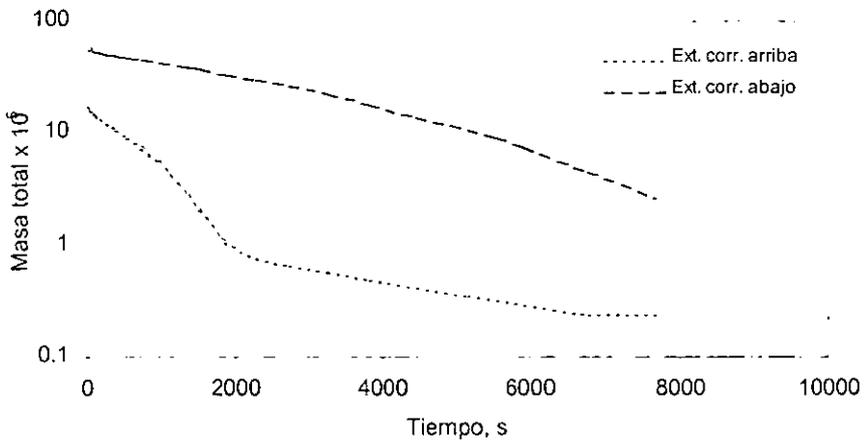


Figura 5.14 Variación de la masa total en los extremos

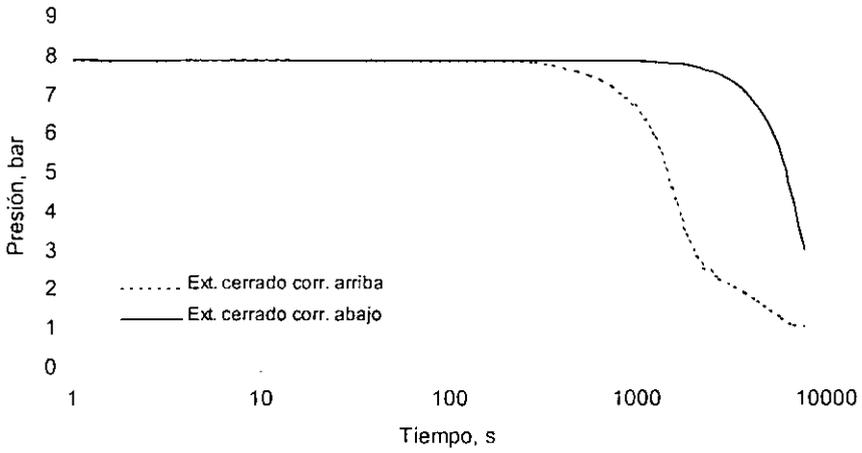


Figura 5.15 Variación de la presión en los extremos

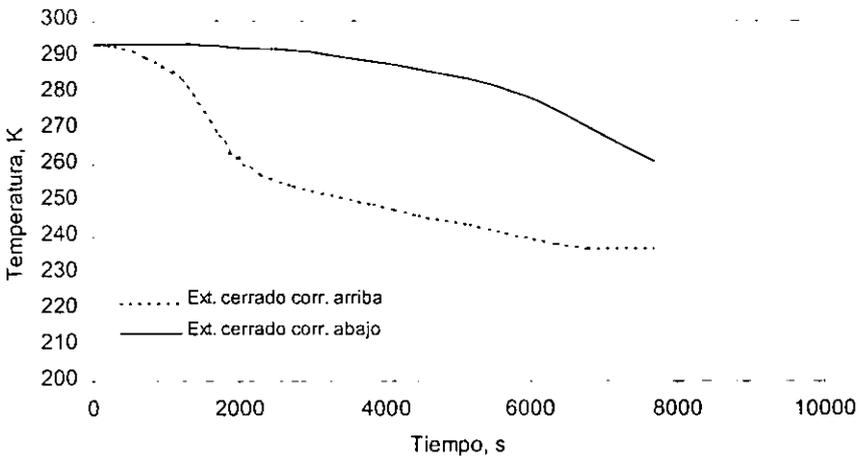


Figura 5.16 Variación de la temperatura en los extremos

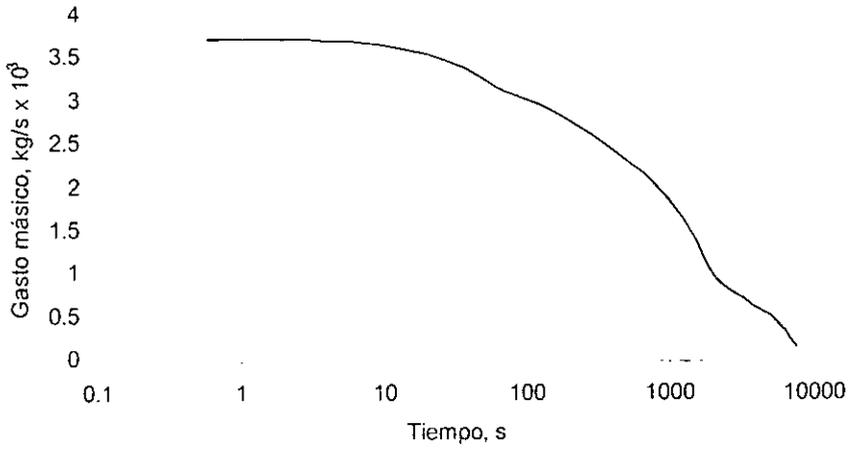


Figura 5.17 Variación del gasto másico en la ruptura

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones de este trabajo son las siguientes:

1. Se cumplió con el objetivo primario. Los resultados obtenidos en este estudio conducen a un mejor entendimiento del fenómeno de despresurización y pueden ser utilizados en la predicción de las consecuencias de descarga controladas o no controladas de líquidos volátiles de tuberías de gran longitud.
2. El programa – modelo debe tomarse en cuenta en el campo de la ingeniería de diseño, operación, rehabilitación, así como en el análisis de riesgo de ductos para la toma de decisiones y/o enriquecimiento de criterios.

También se cumplió con los objetivos secundarios:

3. Se desarrolló y validó un modelo matemático que permite simular el comportamiento de la descarga de hidrocarburos volátiles en ductos de transporte. Los resultados obtenidos de la simulación numérica para verificar el programa tienen una desviación de +- 4% de los experimentales, siendo estos satisfactorios (en términos ingenieriles) para la validación del simulador.
4. Se investigó la influencia de la transferencia de calor sobre el comportamiento de flujo bifásico durante el proceso de descarga de una línea, resultando significativamente la influencia en líneas largas y para determinar el efecto en líneas cortas se recomienda un cálculo más riguroso de la transferencia de calor. Se recomienda en ambos casos tomar en cuenta el efecto de la capacidad térmica de la pared de la tubería, la cual puede ser significativa para flujos bifásicos.
5. El programa - modelo permite calcular las variables de presión, temperatura, flujos y fracción de vacío en cualquier punto de la línea durante todo el proceso de

descarga, situación que programas similares no realizan, ofreciendo únicamente resultados puntuales o promedio.

6. Las temperaturas más bajas dentro de la línea se generan para el caso de la descarga adiabática, resultando un caso típico de la ruptura de una línea que esta aislada (térmicamente), un ducto enterrado.

7. En líneas largas el efecto de la caída de presión al inicio del proceso de descarga es insignificante, caso contrario en líneas cortas (100 – 1000 m), esto es porque el programa sobrepredice la presión en esta etapa del proceso (tiempos muy cortos, <1 segundo).

8. El efecto de la energía cinética para ductos horizontales pequeños es insignificante.

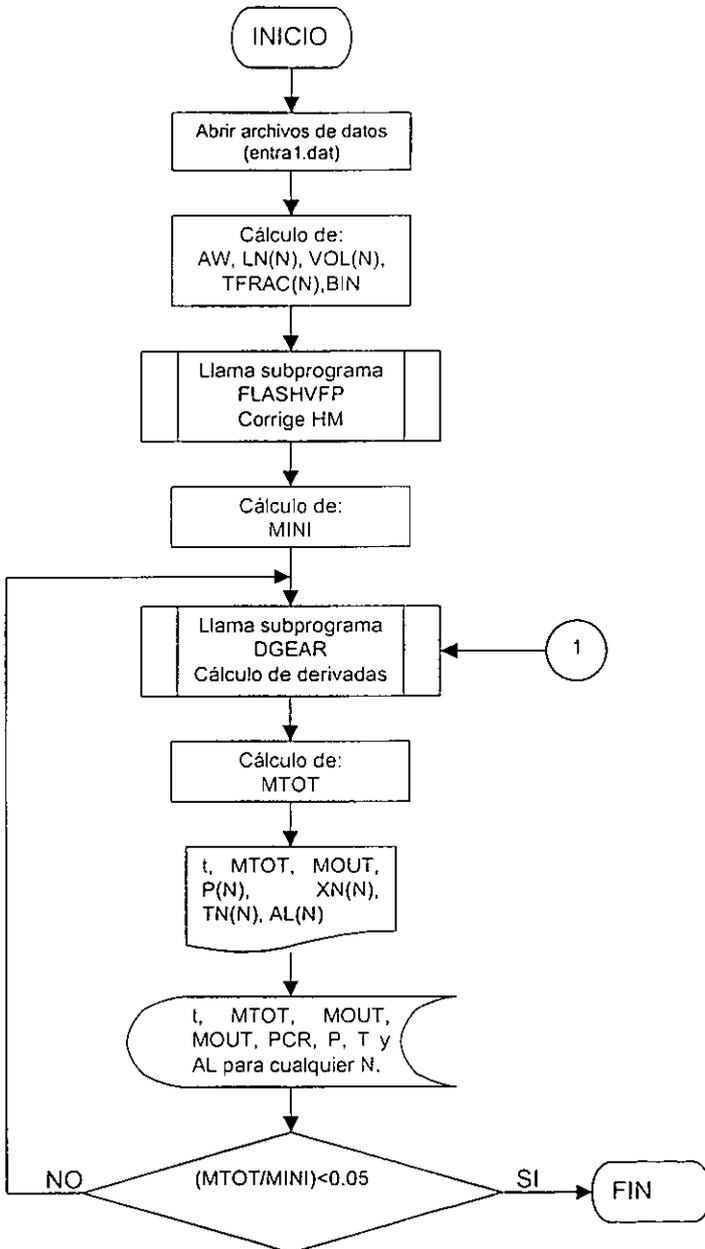
9. Las predicciones del modelo son independientes del número de nodos (seccionamiento de la línea a simular) que se utilicen en una simulación (solo aumenta el tiempo de máquina).

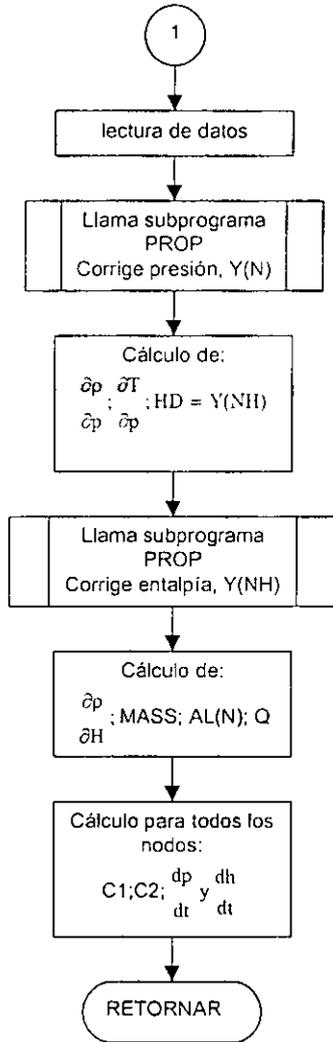
Las recomendaciones son las siguientes:

Ampliar y mejorar el programa considerando sistemas fluyentes con dominio de cualquier ángulo de inclinación, inclusión de otros modelos hidrodinámicos, desarrollar una base de datos de propiedades de hidrocarburos y una interfase gráfica–visual para su manejo más amigable, todo esto dentro de un horizonte a corto plazo.

- Para proyectos a largo plazo, se recomienda acoplar el programa a otros que permitan evaluar la dispersión de gases, a sistemas de análisis de riesgos (estimar el riesgo y evaluar consecuencias) y a sistemas de detección y localización de fugas de hidrocarburos.

Diagrama de bloques del programa "DESCARGA".





Los subprogramas PROP, GSUB y GCRIT son los encargados de calcular las propiedades termodinámicas de la mezcla en estudio, y las cuales tienen la función de llamar (interactuar) con el programa EQFASES.O.

El subprograma DGEAR es un método numérico que resuelve un sistema de ecuaciones.

El subprograma DLIQ corrige la densidad de la fase líquida de las mezclas multicomponentes por el método de RACKETT.

## MANUAL DEL PROGRAMA

### A. Introducción

#### A.1 Descripción del programa

El programa desarrollado en este trabajo permite simular el comportamiento de flujos transitorios bifásicos multicomponentes durante la descarga de ductos que transportan líquidos volátiles, específicamente, en sistemas horizontales.

Este programa fue elaborado a partir de un modelo de flujo bifásico transitorio, numérico que se basa en las ecuaciones de conservación de cantidad de masa, momento y energía en forma unidimensional. El modelo consiste de tres partes: un modelo que describe la hidrodinámica del flujo en la tubería, un modelo de flujo en la descarga, y un modelo de transferencia de calor entre la pared de la tubería y el flujo del fluido. Estas ecuaciones son la base del simulador, y las cuales fueron programadas.

El programa permite calcular en todos los puntos del ducto la variación de temperatura, presión, fracción de vacío, calidad y gasto másico del líquido volátil transportado, durante todo el proceso de descarga, en otras palabras, el simulador permite calcular las variables de interés como una función del tiempo, aportando así mejores estimaciones del comportamiento del fenómeno.

El programa permite definir el tipo de ruptura:

- Rupturas completas ( $D_{ruptura} = D_{tubería}$ ).
- Rupturas parciales ( $D_{ruptura} < D_{tubería}$ ).

y la posición de la misma:

- Ruptura en un extremo de la línea.
- Ruptura en cualquier posición de la línea.

## A.2 Descripción del manual

El programa fue desarrollado en lenguaje de programación FORTRAN 77, por lo que en primer lugar se dan algunas recomendaciones que se deben tomar en cuenta debido a que serán de gran utilidad para el usuario al momento de que quiera realizar alguna simulación con éxito.

Se incluye la explicación del cómo introducir los datos correctamente y así poder realizar una simulación. También se presenta la forma de cómo poder obtener los resultados calculados y así realizar las interpretaciones que más le convengan al usuario.

Finalmente se presentan 3 ejemplos ilustrativos, los cuales son similares a los que se presentaron en el capítulo 5, y esto es con el fin de que el usuario pueda comprender y sistematizar el manejo del simulador sin ninguna dificultad.

De esta forma, el usuario podrá introducir los datos correctamente, llevar a cabo la simulación, interpretar los resultados y compararlos con los propuestos en el capítulo de aplicaciones y así de esta forma tendrá la oportunidad de realizar otros ejemplos y/o aplicaciones.

## B. Recomendaciones previas

El lenguaje de programación que se utilizó para desarrollar el programa fue para estación de trabajo, por lo tanto, el usuario deberá seguir cuidadosamente todas las observaciones que se ilustran a continuación para poder realizar una simulación sin tener alguna dificultad.

El programa, así como sus rutinas tienen en común ciertas variables que el usuario debe aportar como datos antes de iniciar cualquier cálculo, los datos pueden suministrarse por dos rutas:

- Por el listado propio del programa
- Por un archivo de lectura de datos

Las variables que aparecen en el programa y en el archivo de datos, algunas son enteras y otras son reales de doble precisión. Por tal razón se establece una norma generalizada en el uso de variables, la cual operará sin excepción en todas las rutinas presentadas:

**IMPLICIT REAL\*8 (A-Z)**

**INTEGER I,J,L,N**

Lo cual indica que son *variables reales* aquellas cuya primera letra se halla dentro del conjunto de letras desde la "a" a la "z", exceptuando las variables iniciadas con las letras "I", "J", "L" y "N", que pertenecen al conjunto de las *variables enteras*. Así, por ejemplo, la variable IMAX es del tipo de las enteras y la variable MTOT pertenece al conjunto de las reales de doble precisión.

## C. Datos de entrada

Como ya se mencionó los datos que necesita el programa para que pueda realizar una simulación se introducen de dos formas:

- Datos incluidos en el listado del programa
- Datos transmitidos desde un archivo

### C.1 Datos incluidos en el listado del programa

Los datos necesarios en todo el programa que se transmiten de esta forma son:

```
COMMON/ CONST1 / PC(20),W(20),TC(20),QP(20)
COMMON/ CONST3 / IEQ,IRM
COMMON/ CONST4 / PI,R,TREF,PREF
COMMON/ CONST5 / CPA(20),CPB(20),CPC(20),CPD(20),CPE(20),
                CPF(20),HREF(20),GREF(20)
COMMON/ CONST6 / IMAX,RT,IFLG7,IWTE,FLG8,FLG9
COMMON/ CONST9 / KO(20,20),KP(20,20),KQ(20,20)
COMMON/ CONST10 / MM(20),MMM,NC,ZC(20)
```

En la Tabla C.1 se encuentra la descripción de las variables anteriormente mencionadas:

Tabla C.1 Variables incluidas en el listado del programa

VARIABLE	DESCRIPCION
PC(I)	Vector de la presión crítica.
W(I)	Vector del factor acéntrico.
TC(I)	Vector de la temperatura crítica.
QP(I)	Vector del parámetro de Mathias.
IEQ	Identifica la ecuación de estado(1:RKSM, 2:PRSV)
IRM	Bandera que identifica regla de mezclado
PI	Número $\pi=3.141592$
R	Constante universal de los gases.
TREF	Temperatura del estado de referencia.
PREF	Presión del estado de referencia.
CPA(I), CPB(I),...	Vectores de las constantes del polinomio de la capacidad calorífica: $(C_{p_i} = CPA(i) + CPB(i) \cdot T + CPC(i) \cdot T^2 + CPD(i) \cdot T^3 + CPE(i) \cdot T^4 + CPF(i) \cdot T^5)$
HREF(I)	Vector de la entalpía del estado de referencia del componente puro como gas ideal a TRE y PREF.
GREF(I)	Vector de la energía de Gibbs del estado de referencia del componente puro como gas ideal a TREF Y PREF.
IMAX	Indica el número máximo de iteraciones que se permiten (30).
RT	Criterio de convergencia (0.0005).
IFLG7	Bandera que indica la aplicación del método Wegstein (1:si, 2:no).

Tabla C.1 Continuación

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
IWTE	Indica la frecuencia de aplicación del método Wegstein (3).
FLG8	Límite inferior para el factor del método Wegstein (-0.6).
FLG9	Límite superior para el factor del método Wegstein (5).
KO(I,J),KP(I,J),...	Arreglo para el uso de la regla de Van der Waals
MM(I)	Vector del peso molecular de los componentes presentes en la mezcla.
MMM	Peso molecular promedio de la mezcla.
NC	Número de componentes presentes en la mezcla.
ZC(I)	Vector de la composición de la mezcla (%).

## C.2 Datos transmitidos por el archivo de datos

El archivo que automáticamente busca la rutina de cálculo de propiedades se llama **ENTRA1.DAT**. En este archivo se almacenan los valores de las variables a las condiciones que se quiere simular:

READ(1,2)D,LTOT,XO,PO,MBREAK,MIN,MOUT,PA,PWRZ,PWRT,TLAS,  
TATM,THICK,CW,ROW,THM,ALFA,LSTEP

En la Tabla C.2 se describen cada una de las variables anteriormente mencionadas:

Tabla C.2 Variables transmitidas por el archivo de datos

VARIABLE	DESCRIPCION
D	Diámetro del ducto [m].
LTOT	Longitud del ducto [m].
XO	Calidad inicial de la mezcla [%].
PO	Presión inicial en el ducto [Pa].
MBREAK	Gasto másico en la ruptura del ducto [Kg/sm <sup>2</sup> ].
MIN	Gasto másico en la entrada del ducto [Kg/sm <sup>2</sup> ].
MOU	Gasto másico en la salida del ducto [Kg/sm <sup>2</sup> ].
PA	Presión atmosférica [Pa].
PWRZ	Exponente en la fórmula
PWRT	Exponente en la fórmula de tiempo.
TLAST	Tiempo estimado de duración del proceso de descarga del ducto [s].
TATM	Temperatura atmosférica [°K].
THICK	Espesor de la pared del ducto [m].
CW	Capacidad térmica del ducto [J/mol °K].
ROW	Densidad del acero del ducto [Kg/m <sup>3</sup> ].
THM	Constante
ALFA	Valor de la ruptura [1:completa, 0.1-0.9:parcial]
LSTEP	Intervalo de tiempo en que se imprimen los resultados.

Existen dos datos más muy importantes, que se declaran en la lista del programa principal, uno es el parámetro **NN**, que representa el número de nodos o celdas por los cuales estará compuesto (dividido) nuestro ducto. El otro es **NBREAK**, es la variable que asigna en que nodo se simulara la ruptura.

Note que **NN** y **NBREAK** son variables del tipo entero, por lo cual solo leerán valores de tipo entero.

### C.3 Unidades

En este proyecto, con el fin de que el programa no tenga algún conflicto de inconsistencia de unidades se sugiere al usuario que emplee el Sistema Internacional de Unidades. Las unidades de presión y temperatura deberán ser las mismas que las de las propiedades críticas respectivas. Debe tenerse cuidado ya que el sistema de unidades de energía esta dado por la constante universal de los gases, procurándose que las unidades de presión y temperatura sean semejantes, así como, las unidades de longitud y tiempo, en la Tabla C.3 se especifican las unidades de las variables anteriores en términos del sistema internacional de unidades.

Tabla C.3 Lista de variables recomendadas

VARIABLE	UNIDADES (SI)
Presión	PA
Temperatura	K
Constante R	8.314 j/(mol K)
Longitud	m
Tiempo	s

Presión, utilizar presiones absolutas para todas las variables: PC(I), PREF, PO y PA.

Temperatura, Utilizar temperaturas absolutas para todas las variables: TC(I), TREF y TATM.

Entalpía, Entropía, Capacidad Calorífica y Constante Universal de los Gases Utilizar las unidades correspondientes al Sistema Internacional de Unidades (SI).

## D. Datos de salida

Hasta el momento todos los resultados son enviados y capturados en archivos con extensión de lectura. Estos resultados se encuentran programados como valores de doble precisión, por lo que su interpretación tendrá que requerir de algunos trabajos de conversión para poderlos gráficar.

### D.1 Datos transmitidos por los archivos SALE1, 2, 3 y 4.OUT

En estos archivos se almacenan los resultados finales de la simulación:

SALE1.OUT  
T,MTOT,MOUT,PCR

SALE2.OUT  
T,Y(1),Y(NN)

SALE3.OUT  
T,TN(1),TN(NN)

SALE4.OUT  
T,AL(1),AL(NN)

A continuación en la Tabla D.1 se describen las variables de los archivos de salida:

Tabla D.1 Variables de los archivos de salida tipo 1

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
T	Tiempo.
MTOT	Masa total acumulada en el ducto durante su descarga.
MBREAK	Gasto másico en la ruptura.
PCR	Presión crítica.
Y	Presión en los nodos 1, NBREAK-1, NBREAK, NBREAK+1 y NN, respectivamente.
TN	Temperatura en los nodos 1, NBREAK-1, NBREAK, NBREAK+1 y NN, respectivamente.
AL	Fracción de vacío en los nodos 1, NBREAK-1, NBREAK, NBREAK+1 y NN, respectivamente.

En el caso de realizar una simulación con ruptura arbitraria, los archivos de salida estarán conformados por las siguientes variables adicionales, la descripción de las mismas se pueden observar en la Tabla D.2.

SALE1.OUT

T,MTOT,MBREAK,MTOT1,MTOT2,PCR

SALE2.OUT

T,Y(1),Y(NANT),Y(NBREAK),Y(NDES),Y(NN)

SALE3.OUT

T,TN(1),TN(NANT),TN(NBREAK),TN(NDES),TN(NN)

SALE4.OUT

T,AL(1),AL(NANT),AL(NBREAK),AL(NDES),AL(NN)

Tabla D.2 Variables de los archivos de salida tipo 2

VARIABLE	DESCRIPCION
T	Tiempo.
MTOT	Masa total acumulada en el ducto durante su descarga.
MBREAK	Gasto másico en la ruptura.
MTOT1	Gasto másico corriente arriba de la ruptura.
MTOT2	Gasto másico corriente abajo de la ruptura.
PCR	Presión crítica.
Y	Presión en los nodos 1, NBREAK-1, NBREAK, NBREAK+1 y NN, respectivamente.
TN	Temperatura en los nodos 1, NBREAK-1, NBREAK, NBREAK+1 y NN, respectivamente.
AL	Fracción de vacío en los nodos 1, NBREAK-1, NBREAK, NBREAK+1 y NN, respectivamente.

La descripción de las variables con formato de tipo arreglo (matricial) es el siguiente:

- Es el valor de las variables evaluadas en el nodo 1 de la línea simulada, que en el caso de una línea con ruptura al final, representa el extremo cerrado y en el caso de una línea con ruptura arbitraria representa al primer extremo cerrado.
- Es el valor de las variables evaluadas en el último nodo de la línea simulada, que en el caso de una línea con ruptura al final, representa el extremo roto y en el caso de una línea con ruptura arbitraria, representa al segundo extremo cerrado.

- (NANT) Es el valor de las variables evaluadas en el nodo anterior (corriente arriba) al nodo de ruptura.
  
- (NDES) Es el valor de las variables evaluadas en el nodo posterior (corriente abajo) al nodo de ruptura.
  
- (NBREAK) Es el valor de las variables evaluadas en el nodo de ruptura.

## E. Ejemplos ilustrativos

Para tener una mejor comprensión de cómo utilizar este simulador, se realizarán algunos ejercicios como ejemplo, los cuales son similares a los que se ilustraron en el capítulo 5, sólo se cambiarán algunas variables, de esta manera el usuario podrá aclarar sus dudas, analizar los resultados y crear criterios de acción y/o decisión.

Como Ejemplo ilustrativo 1 se simula el oleoducto Paredón-Cactus, este ejemplo es similar al ejemplo 1 del capítulo 5, la única diferencia es la longitud del sistema, en este ejemplo el sistema es más corto (ver Figura E.1).

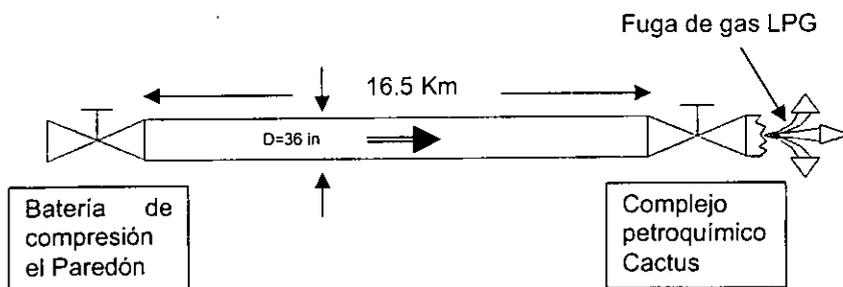


Figura E.1 Esquema simplificado de la línea Paredón - Cactus

Las condiciones de operación y geometría del ducto simulado se presentan en la Tabla E.1, los parámetros necesarios para el simulador que describen la ubicación y tipo de ruptura, se pueden observar en la Tabla E.2.

Tabla E.1 Características de la línea Paredón - Cactus

Longitud	16,500 m (horizontal)
Diámetro	0.9144 m
Fluido	Gas LPG
Composición	95 % propano, 5 % n-butano
Sitio de ruptura	En un extremo
Tipo de ruptura	Total

Tabla E.2 Características de la ruptura

Numero de nodos	20
Malla uniforme (PWRZ)	1
Nodo de ruptura	20
Ruptura total (ALFA)	1

Con los anteriores datos, en primer lugar se definirán los datos de las variables que se encuentran incluidos en el listado del programa y posteriormente los datos de las variables que se encuentran en el archivo ENTRA1.DAT, a continuación se describen las instrucciones tal como se encuentran en el programa:

## E.1 Datos de entrada incluidos en el listado del programa

A continuación se describe la forma de estructurar la información incluida en el listado del programa:

```

C*****
C          DATOS PARA EL CALCULO DEL EQUILIBRIO DE FASES
C*****
PARAMETER(NN=20)
.
.
.
C**** Declaración del número de componentes y estado de referencia:
      NC=2
      TREF=298.2D0
      PREF=1.0132503D0
      PI=3.141592D0

C**** Entrada de datos de propiedades de los componentes:
C      (SISTEMA DE UNIDADES= T/K, p/bar, R/[J/mol K], v/cm^3)

      R=8.314D0

C*** Propano:
      TC(1) = 369.82D0
      PC(1) = 41.9396D0
      W(1)  = 0.15416D0
      QP(1) = -0.03136D0
      HREF(1)= -1.04584D+5
      GREF(1)= -2.34498D+4
      CPA(1) = 32.5304D0
      CPB(1) = 3.54803D-2
      CPC(1) = 5.56024D-4
      CPD(1) = -8.4507D-7
      CPE(1) = 5.06156D-10
      CPF(1) = -1.10837D-13

C*** n-Butano:
      TC(2) = 425.16D0
      PC(2) = 37.4696D0
      W(2)  = 0.20096D0
      QP(2) = -0.03443D0
      HREF(2)= -1.2553D+5
      GREF(2)= -1.7138D+4
      CPA(2) = 32.5062D0
      CPB(2) = 1.76885D-1
      CPC(2) = 2.87743D-4
      CPD(2) = -4.83919D-7
      CPE(2) = 2.65932D-10
      CPF(2) = -5.16188D-14

```

C\*\*\* Parámetros de convergencia:

```
IEQ=2
IMAX=20
IWTE=3
FLG8=-0.6D0
FLG9= 5.D0
RT=0.0001D0
```

C\*\*\* Datos para el uso de la regla de van der Waals (1 parámetro):

C\*\*\* Para la ecuación de PR  $k_{ij}=k_{ji}=0.0033$

```
IRM=2
KO(1,2)=0.D0
KO(2,1)=0.D0
KO(1,1)=0.D0
```

C\*\* Composición de la mezcla

```
ZC(1)=0.95
ZC(2)=0.05
MM(1)=44.09
MM(2)=58.12
MMM=0.
DO I=1,NC
MMM=MMM+MM(I)*ZC(I)
END DO
```

.  
.  
.

Así, de esta forma se tendrá que aportar los datos para este Ejemplo ilustrativo 1.

## E.2 Datos transmitidos por el archivo de datos ENTRA1.DAT

A continuación se describe la forma de estructurar la información del archivo ENTRA1.DAT, el cual describe el sistema a simular.

En el programa se encuentran estas tres instrucciones (OPEN, READ y FORMAT), las cuales le dicen al programa que los datos de las condiciones de operación, así como las del sistema que se va a simular se encuentran en el archivo ENTRA1.DAT.

```

OPEN (UNIT=1, FILE='entral.dat', STATUS='UNKNOWN')
.
.
READ (1, 2) D, LTOT, XO, PO, MBREAK, MIN, MOUT, PA, PWRZ, PWRT, TLAST, TATM
*, THICK, CW, ROW, THM, ALFA, LSTEP
.
.
2 FORMAT (2 (6D12.5/), 5D12.5/I3)

```

La forma en que se debe de colocar los datos en el archivo ENTRA1.DAT es en forma de tabulación (ver Tabla E.3), además, la mayoría de los valores se deben de escribir en la forma de variable de doble precisión (ver Tabla E.4).

Se presentan dos tablas, que representan la forma de ubicación de las variables, así como la manera en que se deben de escribir los valores, por ejemplo en la Tabla I.VIII se presenta la ubicación de la variable LTOT, el valor numérico para esta variable es .16500D+05, como se puede observar en la Tabla E.4. Si el usuario sigue estas indicaciones, el usuario tendrá remotas posibilidades de cometer un error al momento de introducir estos datos.

Tabla E.3 Ubicación de las variables del archivo de datos ENTRA1.DAT

D	LTOT	XO	PO	MBREAK	MIN
MOUT	PA	PWRZ	PWRT	TLAST	TATM
THICK	CW	ROW	THM	ALFA	
LSTEP					

Tabla E.4 Valor numérico de las variables del archivo de datos ENTRA1.DAT

.91440D+00	.16500D+05	1.0000D-4	.80000D+06	.10000D-01	.00001D+00
.00001D+00	.10000D+06	.10000D+01	.30000D+01	.13000D+05	.29500D+03
.0016	.47300D3	.78010D+04	0.	.1D1	
30					

Si el usuario quiere simular un ducto mas grande (longitud), por ejemplo 30 km, solo tiene que entrar al archivo ENTRA1.DAT y modificar el valor correspondiente a la variable LTOT, como se observa en la Tabla E.5:

Tabla E.5 Valor modificado de la variable LTOT

.91440D+00	.30000D+05	1.0000D-4	.80000D+06	.10000D-01	.00001D+00
.00001D+00	.10000D+06	.10000D+01	.30000D+01	.13000D+05	.29500D+03
.0016	.47300D3	.78010D+04	0.	.1D1	
30					

Ahora si el usuario quiere simular un ducto con otro diámetro, por ejemplo 10 pulgadas, solo tiene que entrar al archivo ENTRA1.DAT y modificar el valor correspondiente a la variable D, como se observa en la TABLA E.6.

Tabla E.6 Valor modificado de la variable D

.25400D+00	.16500D+05	1.0000D-4	.80000D+06	.10000D-01	.00001D+00
.00001D+00	.10000D+06	.10000D+01	.30000D+01	.13000D+05	.29500D+03
.0016	.47300D3	.78010D+04	0.	.1D1	
30					

A continuación se presenta los resultados que el programa calcula, Tablas E.7-E.10, y los gráficos que se obtienen a partir de los mismos, Figura E.2 – E.6, por lo que el usuario podrá reproducir la simulación y comparar sus resultados.

Tabla E.7 Resultados del archivo SALE1.OUT

T	MTOT	MOUT	PCR
.4815D+00	.5428D+07	.3753D+04	.6688D+06
.3852D+01	.5415D+07	.3713D+04	.6622D+06
.1300D+02	.5381D+07	.3597D+04	.6427D+06
.3081D+02	.5319D+07	.3336D+04	.5988D+06
.6019D+02	.5228D+07	.2882D+04	.5219D+06
.1040D+03	.5110D+07	.2210D+04	.4060D+06
.1651D+03	.4999D+07	.1593D+04	.2972D+06
.2465D+03	.4882D+07	.1285D+04	.2416D+06
.3510D+03	.4755D+07	.1184D+04	.2231D+06
.4815D+03	.4602D+07	.1111D+04	.2099D+06
.6409D+03	.4428D+07	.1043D+04	.1973D+06
.8320D+03	.4240D+07	.9800D+03	.1858D+06
.1058D+04	.4024D+07	.9196D+03	.1747D+06
.1321D+04	.3792D+07	.8650D+03	.1646D+06
.1625D+04	.3525D+07	.8124D+03	.1548D+06
.1972D+04	.3261D+07	.7687D+03	.1467D+06
.2366D+04	.2950D+07	.7238D+03	.1384D+06
.2808D+04	.2644D+07	.6834D+03	.1308D+06
.3302D+04	.2323D+07	.6426D+03	.1232D+06
.3852D+04	.1980D+07	.5979D+03	.1148D+06
.4459D+04	.1632D+07	.5478D+03	.1054D+06
.5127D+04	.1275D+07	.4870D+03	.1012D+06
.5858D+04	.8938D+06	.4045D+03	.1012D+06
.6656D+04	.5943D+06	.3107D+03	.1012D+06
.7523D+04	.3979D+06	.2402D+03	.1012D+06
.8463D+04	.2193D+06	.1458D+03	.1012D+06

Tabla E.8 Resultados del archivo SALE2.OUT

T	Y(1)	Y(NN)
.4815D+00	.8000D+06	.7994D+06
.3852D+01	.8000D+06	.7946D+06
.1300D+02	.8000D+06	.7801D+06
.3081D+02	.8000D+06	.7445D+06
.6019D+02	.8000D+06	.6753D+06
.1040D+03	.8000D+06	.5635D+06
.1651D+03	.8000D+06	.4301D+06
.2465D+03	.8000D+06	.3587D+06
.3510D+03	.8000D+06	.3332D+06
.4815D+03	.8000D+06	.3157D+06
.6409D+03	.8000D+06	.2987D+06
.8320D+03	.8000D+06	.2824D+06
.1058D+04	.7984D+06	.2669D+06
.1321D+04	.7934D+06	.2525D+06
.1625D+04	.7886D+06	.2393D+06
.1972D+04	.7818D+06	.2271D+06
.2366D+04	.7725D+06	.2157D+06
.2808D+04	.7598D+06	.2045D+06
.3302D+04	.7425D+06	.1932D+06
.3852D+04	.7189D+06	.1809D+06
.4459D+04	.6868D+06	.1669D+06
.5127D+04	.6426D+06	.1510D+06
.5858D+04	.5819D+06	.1361D+06
.6656D+04	.5001D+06	.1225D+06
.7523D+04	.3941D+06	.1120D+06
.8463D+04	.2748D+06	.1052D+06

Tabla E.9 Resultados del archivo SALE3.OUT

T	TN(1)	TN(NN)
.4815D+00	.2935D+03	.2934D+03
.3852D+01	.2935D+03	.2932D+03
.1300D+02	.2935D+03	.2925D+03
.3081D+02	.2935D+03	.2908D+03
.6019D+02	.2935D+03	.2872D+03
.1040D+03	.2935D+03	.2805D+03
.1651D+03	.2935D+03	.2719D+03
.2465D+03	.2935D+03	.2662D+03
.3510D+03	.2935D+03	.2641D+03
.4815D+03	.2935D+03	.2624D+03
.6409D+03	.2935D+03	.2608D+03
.8320D+03	.2935D+03	.2592D+03
.1058D+04	.2934D+03	.2576D+03
.1321D+04	.2931D+03	.2561D+03
.1625D+04	.2929D+03	.2545D+03
.1972D+04	.2926D+03	.2531D+03
.2366D+04	.2921D+03	.2516D+03
.2808D+04	.2915D+03	.2502D+03
.3302D+04	.2907D+03	.2487D+03
.3852D+04	.2895D+03	.2470D+03
.4459D+04	.2878D+03	.2449D+03
.5127D+04	.2853D+03	.2423D+03
.5858D+04	.2811D+03	.2394D+03
.6656D+04	.2754D+03	.2367D+03
.7523D+04	.2689D+03	.2352D+03
.8463D+04	.2582D+03	.2338D+03

Tabla E.10 Resultados del archivo SALE4.OUT

T	AL(1)	AL(NN)
.4815D+00	.2875D-02	.1080D-01
.3852D+01	.2875D-02	.6058D-01
.1300D+02	.2875D-02	.1888D+00
.3081D+02	.2875D-02	.4036D+00
.6019D+02	.2875D-02	.6347D+00
.1040D+03	.2875D-02	.8185D+00
.1651D+03	.2875D-02	.9088D+00
.2465D+03	.2875D-02	.9383D+00
.3510D+03	.2875D-02	.9465D+00
.4815D+03	.2875D-02	.9519D+00
.6409D+03	.2875D-02	.9567D+00
.8320D+03	.2994D-02	.9609D+00
.1058D+04	.2039D-01	.9647D+00
.1321D+04	.7062D-01	.9679D+00
.1625D+04	.1170D+00	.9709D+00
.1972D+04	.1722D+00	.9733D+00
.2366D+04	.2459D+00	.9756D+00
.2808D+04	.3256D+00	.9776D+00
.3302D+04	.4139D+00	.9795D+00
.3852D+04	.5107D+00	.9816D+00
.4459D+04	.6091D+00	.9838D+00
.5127D+04	.7077D+00	.9862D+00
.5858D+04	.8079D+00	.9886D+00
.6656D+04	.8816D+00	.9903D+00
.7523D+04	.9270D+00	.9912D+00
.8463D+04	.9650D+00	.9921D+00

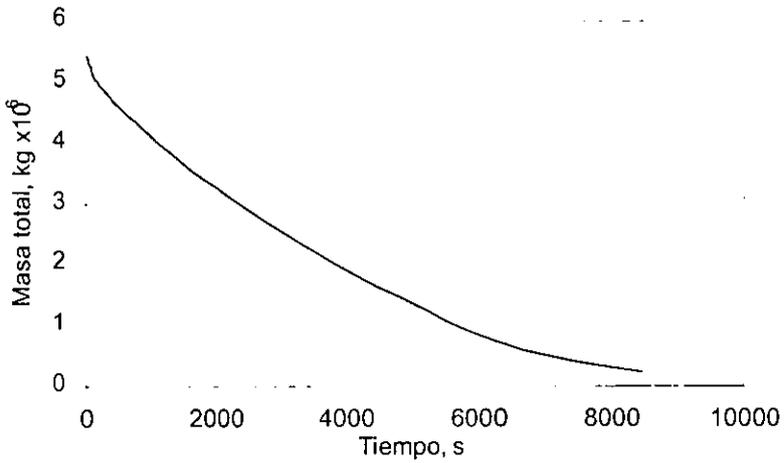


Figura E.2 Variación de la masa total en el ducto

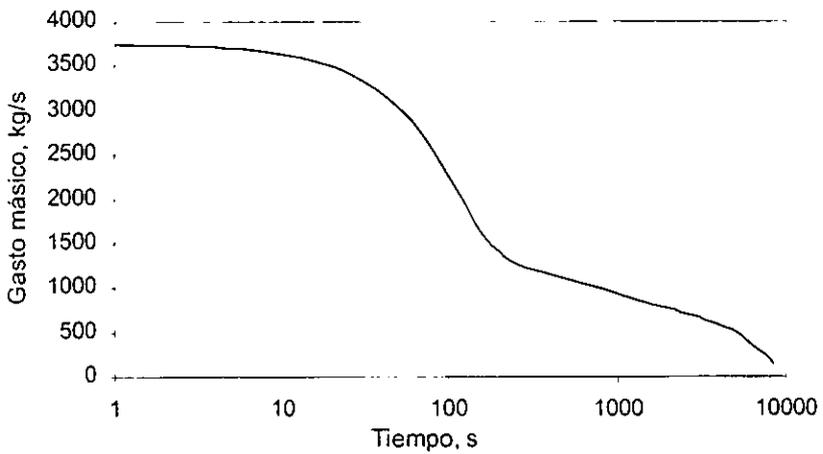


Figura E.3 Variación del gasto másico en la ruptura

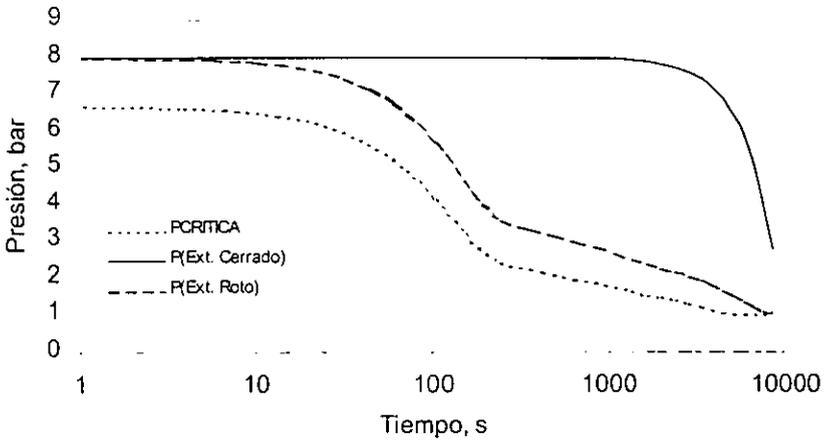


Figura E.4 Variación de la presión en los extremos

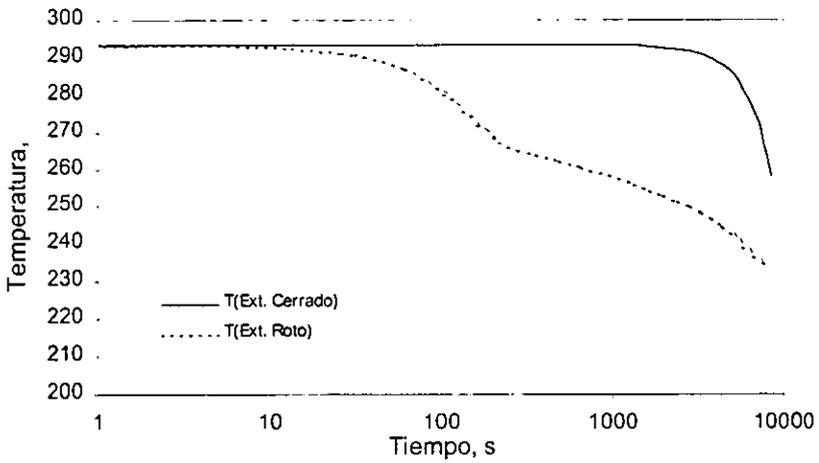


Figura E.5 Variación de la temperatura en los extremos

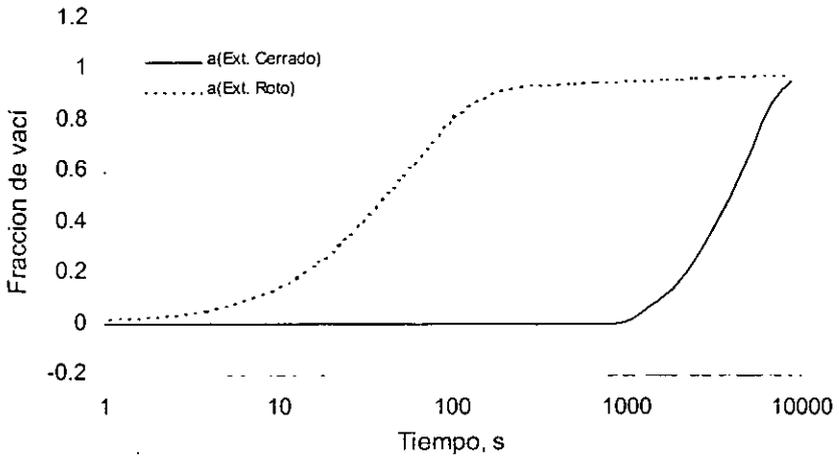


Figura E.6 Variación de la fracción de vacío en los extremos

Como ejemplo ilustrativo 2, se simula el oleoducto Paredón-Cactus, este ejemplo es similar al ejemplo 3 del capítulo 5, la única diferencia es la ubicación del nodo de ruptura, en este ejemplo el nodo de ruptura es mayor (NBREAK=15), en la Figura E.7 se puede observar esta diferencia.

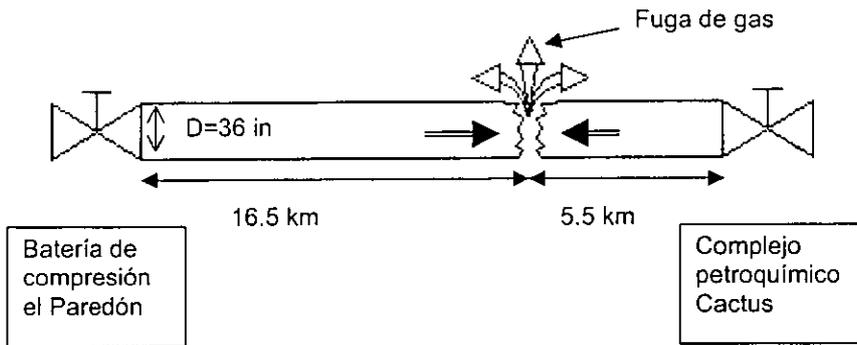


Figura E.7 Esquema simplificado de la línea Paredón - Cactus

Las condiciones de operación y geometría del ducto simulado se presentan en la Tabla E.11, los parámetros necesarios para el simulador que describen la ubicación y tipo de ruptura, se pueden observar en la Tabla E.12.

Tabla E.11 Características de la línea Paredón - Cactus

Longitud	22,000 m (horizontal)
Diámetro	0.9144 m
Fluido	Gas LPG
Composición	95 % propano, 5 % n-butano
Sitio de ruptura	16,500 m
Tipo de ruptura	Total

Tabla E.12 Características de la ruptura

Numero de nodos	20
Malla uniforme (PWRZ)	1
Nodo de ruptura	15
Ruptura total (ALFA)	1

Con la información anterior, en primer lugar se definirán los datos de las variables que se encuentran incluidos en el listado del programa y posteriormente los datos de las variables que se encuentran en el archivo ENTRA2.DAT, a continuación se describen las instrucciones tal como se encuentran en el programa:

## E.3 Datos de entrada incluidos en el listado del programa (ejemplo ilustrativo 2)

A continuación se describe la forma de estructurar la información incluida en el listado del programa:

```

C*****
C          DATOS PARA EL CALCULO DEL EQUILIBRIO DE FASES
C*****
PARAMETER(NN=20)
.
.
.
C**** Declaración del número de componentes y estado de referencia:
      NC=2
      TREF=298.2D0
      PREF=1.0132503D0
      PI=3.141592D0

C**** Entrada de datos de propiedades de los componentes:
C      (SISTEMA DE UNIDADES= T/K, p/bar, R/[J/mol K], v/cm^3)

      R=8.314D0

C**** Propano:
      TC(1) = 369.82D0
      PC(1) = 41.9396D0
      W(1)  = 0.15416D0
      QP(1) = -0.03136D0
      HREF(1) = -1.04584D+5
      GREF(1) = -2.34498D+4
      CPA(1) = 32.5304D0
      CPB(1) = 3.54803D-2
      CPC(1) = 5.56024D-4
      CPD(1) = -8.4507D-7
      CPE(1) = 5.06156D-10
      CPF(1) = -1.10837D-13

C**** n-Butano:
      TC(2) = 425.16D0
      PC(2) = 37.4696D0
      W(2)  = 0.20096D0
      QP(2) = -0.03443D0
      HREF(2) = -1.2553D+5
      GREF(2) = -1.7138D+4
      CPA(2) = 32.5062D0
      CPB(2) = 1.76885D-1
      CPC(2) = 2.87743D-4
      CPD(2) = -4.83919D-7
      CPE(2) = 2.65932D-10
      CPF(2) = -5.16188D-14

```

C\*\*\* Parámetros de convergencia:

```
IEQ=2
IMAX=20
IWTE=3
FLG8=-0.6D0
FLG9= 5.D0
RT=0.0001D0
```

C\*\*\* Datos para el uso de la regla de van der Waals (1 parámetro):

C\*\*\* Para la ecuación de PR kij=kji=0.0033

```
IRM=2
KO(1,2)=0.D0
KO(2,1)=0.D0
KO(1,1)=0.D0
```

C\*\* Composición de la mezcla

```
ZC(1)=0.95
ZC(2)=0.05
MM(1)=44.09
MM(2)=58.12
MMM=0.
DO I=1,NC
MMM=MMM+MM(I)*ZC(I)
END DO
```

```
.
.
.
.
.
```

NBREAK=15

```
.
.
.
.
```

Así, de esta forma se tendrá que aportar los datos para el ejemplo ilustrativo 2.

#### E.4 Datos transmitidos por el archivo de datos ENTRA2.DAT

A continuación se describe la forma de estructurar la información del archivo ENTRA2.DAT, el cual describe el sistema a simular.

En el programa se encuentran estas tres instrucciones (OPEN, READ y FORMAT), las cuales le dicen al programa que los datos de las condiciones de operación, así como las del sistema que se va a simular se encuentran en el archivo ENTRA2.DAT.

```

OPEN (UNIT=1, FILE='entra2.dat', STATUS='UNKNOWN')
.
.
READ (1,2) D, LTOT, XO, PO, MBREAK, MIN, MOUT, PA, PWRZ, PWRT, TLAST, TATM
*, THICK, CW, ROW, THM, ALFA, LSTEP
2 FORMAT(2(6D12.5/), 5D12.5/I3)

```

La forma en que se debe de colocar los datos en el archivo ENTRA2.DAT es en forma de tabulación (ver Tabla E.13), además, la mayoría de los valores se deben de escribir en la forma de variable de doble precisión (ver Tabla E.14).

Se presentan dos tablas, que representan la forma de ubicación de las variables, así como la manera en que se deben escribir los valores, por ejemplo en la Tabla E.13 se presenta la ubicación de la variable LTOT, el valor numérico para esta variable es .22000D+05, como se puede observar en la Tabla E.14. Si se siguen estas indicaciones, el usuario tendrá remotas posibilidades de cometer un error al momento de introducir estos datos.

Tabla E.13 Ubicación de las variables del archivo de datos ENTRA2.DAT

D	LTOT	XO	PO	MBREAK	MIN
MOUT	PA	PWRZ	PWRT	TLAST	TATM
THICK	CW	ROW	THM	ALFA	
LSTEP					

Tabla E.14 Valor numérico de las variables del archivo de datos ENTRA2.DAT

.91440D+00	.22000D+05	1.0000D-4	.80000D+06	.10000D-01	.00001D+00
.00001D+00	.10000D+06	.10000D+01	.30000D+01	.13000D+05	.29500D+03
.0016	.47300D3	.78010D+04	0.	.1D1	
30					

Como se puede observar, el archivo ENTRA2.DAT, cuenta con los mismos datos que el archivo ENTRA1.DAT del ejemplo anterior.

Ahora, si el usuario quiere cambiar la posición de ruptura (diferente a NBREAK=15), por ejemplo NBREAK 11, solo tiene que entrar al listado del programa y modificar la variable NBREAK, como se observa a continuación:

```
.  
. .  
. .  
NBREAK=11  
. .  
. .  
. .
```

Esto provoca que el programa sea poco versátil, debido a que, siempre que se quiera cambiar de posición de ruptura, el usuario debe entrar al listado del programa, modificar la variable NBREAK y compilar el programa nuevamente, labor poco usual para programas con interfase gráfico–visual.

A continuación se presenta los resultados que el programa calcula, Tablas E.15 - E.18, y los gráficos que se obtienen a partir de los mismos, Figura E.8 – E.16, por lo que el usuario podrá reproducir la simulación y comparar sus resultados.

Tabla E.15 Resultados del archivo SALE5.OUT

T	MTOT	MBREAK	MTOT1	MTOT2	PCR
.5556D+00	.7237D+07	.3753D+04	.5247D+07	.1990D+07	.6688D+06
.4444D+01	.7221D+07	.3717D+04	.5239D+07	.1982D+07	.6628D+06
.1500D+02	.7182D+07	.3618D+04	.5220D+07	.1962D+07	.6462D+06
.3556D+02	.7110D+07	.3416D+04	.5184D+07	.1926D+07	.6122D+06
.6944D+02	.6994D+07	.3152D+04	.5127D+07	.1867D+07	.5678D+06
.1200D+03	.6832D+07	.2995D+04	.5055D+07	.1777D+07	.5412D+06
.1906D+03	.6630D+07	.2815D+04	.4964D+07	.1666D+07	.5107D+06
.2844D+03	.6378D+07	.2632D+04	.4851D+07	.1528D+07	.4794D+06
.4050D+03	.6065D+07	.2446D+04	.4708D+07	.1357D+07	.4473D+06
.5556D+03	.5707D+07	.2272D+04	.4543D+07	.1164D+07	.4172D+06
.7394D+03	.5310D+07	.2103D+04	.4357D+07	.9522D+06	.3876D+06
.9600D+03	.4864D+07	.1905D+04	.4142D+07	.7215D+06	.3528D+06
.1221D+04	.4398D+07	.1667D+04	.3903D+07	.4948D+06	.3107D+06
.1524D+04	.3934D+07	.1373D+04	.3638D+07	.2959D+06	.2581D+06
.1875D+04	.3506D+07	.1049D+04	.3351D+07	.1547D+06	.1991D+06
.2276D+04	.3149D+07	.7964D+03	.3064D+07	.8549D+05	.1526D+06
.2729D+04	.2801D+07	.6624D+03	.2739D+07	.6189D+05	.1275D+06
.3240D+04	.2479D+07	.6205D+03	.2423D+07	.5633D+05	.1196D+06
.3811D+04	.2093D+07	.5816D+03	.2042D+07	.5170D+05	.1123D+06
.4444D+04	.1792D+07	.5453D+03	.1744D+07	.4752D+05	.1054D+06
.5145D+04	.1333D+07	.4765D+03	.1293D+07	.4033D+05	.1010D+06
.5916D+04	.1004D+07	.4136D+03	.9689D+06	.3548D+05	.1010D+06
.6759D+04	.7157D+06	.3420D+03	.6840D+06	.3166D+05	.1010D+06
.7680D+04	.3922D+06	.2226D+03	.3633D+06	.2891D+05	.1010D+06
.8465D+04	.2989D+06	.1689D+03	.2692D+06	.2967D+05	.1010D+06

Tabla E.16 Resultados del archivo SALE6.OUT

T	Y(1)	Y(NANT)	Y(NBREAK)	Y(NDES)	Y(NN)
.5556D+00	.8000D+06	.8000D+06	.7994D+06	.8000D+06	.8000D+06
.4444D+01	.8000D+06	.8000D+06	.7954D+06	.8000D+06	.8000D+06
.1500D+02	.8000D+06	.7999D+06	.7832D+06	.7999D+06	.8000D+06
.3556D+02	.8000D+06	.7987D+06	.7561D+06	.7987D+06	.8000D+06
.6944D+02	.8000D+06	.7917D+06	.7190D+06	.7909D+06	.8000D+06
.1200D+03	.8000D+06	.7766D+06	.6952D+06	.7698D+06	.8000D+06
.1906D+03	.8000D+06	.7613D+06	.6660D+06	.7480D+06	.8000D+06
.2844D+03	.8000D+06	.7439D+06	.6345D+06	.7244D+06	.7991D+06
.4050D+03	.8000D+06	.7231D+06	.6022D+06	.6978D+06	.7908D+06
.5556D+03	.8000D+06	.6998D+06	.5700D+06	.6696D+06	.7732D+06
.7394D+03	.8000D+06	.6749D+06	.5367D+06	.6372D+06	.7476D+06
.9600D+03	.7994D+06	.6484D+06	.4972D+06	.5940D+06	.7049D+06
.1221D+04	.7946D+06	.6201D+06	.4469D+06	.5329D+06	.6345D+06
.1524D+04	.7904D+06	.5915D+06	.3811D+06	.4449D+06	.5228D+06
.1875D+04	.7842D+06	.5683D+06	.3034D+06	.3353D+06	.3757D+06
.2276D+04	.7754D+06	.5571D+06	.2363D+06	.2433D+06	.2526D+06
.2729D+04	.7633D+06	.5499D+06	.2008D+06	.2013D+06	.2018D+06
.3240D+04	.7467D+06	.5349D+06	.1884D+06	.1885D+06	.1886D+06
.3811D+04	.7243D+06	.5120D+06	.1787D+06	.1788D+06	.1789D+06
.4444D+04	.6940D+06	.4824D+06	.1669D+06	.1670D+06	.1672D+06
.5145D+04	.6525D+06	.4441D+06	.1526D+06	.1527D+06	.1529D+06
.5916D+04	.5950D+06	.3925D+06	.1385D+06	.1386D+06	.1388D+06
.6759D+04	.5158D+06	.3230D+06	.1263D+06	.1264D+06	.1265D+06
.7680D+04	.4104D+06	.2393D+06	.1184D+06	.1184D+06	.1184D+06
.8465D+04	.3121D+06	.1792D+06	.1198D+06	.1197D+06	.1196D+06

Tabla E.17 Resultados del archivo SALE7.OUT

T	TN(1)	TN(NANT)	TN(NBREAK)	TN(NDES)	TN(NN)
.5556D+00	.2935D+03	.2935D+03	.2934D+03	.2935D+03	.2935D+03
.4444D+01	.2935D+03	.2935D+03	.2932D+03	.2935D+03	.2935D+03
.1500D+02	.2935D+03	.2934D+03	.2926D+03	.2934D+03	.2935D+03
.3556D+02	.2935D+03	.2934D+03	.2913D+03	.2934D+03	.2935D+03
.6944D+02	.2935D+03	.2930D+03	.2894D+03	.2930D+03	.2935D+03
.1200D+03	.2935D+03	.2923D+03	.2882D+03	.2919D+03	.2935D+03
.1906D+03	.2935D+03	.2916D+03	.2867D+03	.2909D+03	.2935D+03
.2844D+03	.2935D+03	.2907D+03	.2850D+03	.2898D+03	.2934D+03
.4050D+03	.2935D+03	.2897D+03	.2831D+03	.2884D+03	.2930D+03
.5556D+03	.2935D+03	.2885D+03	.2812D+03	.2869D+03	.2921D+03
.7394D+03	.2935D+03	.2872D+03	.2792D+03	.2851D+03	.2909D+03
.9600D+03	.2934D+03	.2858D+03	.2766D+03	.2827D+03	.2887D+03
.1221D+04	.2932D+03	.2842D+03	.2731D+03	.2789D+03	.2849D+03
.1524D+04	.2930D+03	.2825D+03	.2680D+03	.2729D+03	.2782D+03
.1875D+04	.2927D+03	.2812D+03	.2611D+03	.2640D+03	.2674D+03
.2276D+04	.2923D+03	.2805D+03	.2542D+03	.2550D+03	.2560D+03
.2729D+04	.2917D+03	.2800D+03	.2496D+03	.2497D+03	.2498D+03
.3240D+04	.2908D+03	.2791D+03	.2481D+03	.2481D+03	.2481D+03
.3811D+04	.2896D+03	.2774D+03	.2465D+03	.2465D+03	.2466D+03
.4444D+04	.2882D+03	.2757D+03	.2450D+03	.2450D+03	.2451D+03
.5145D+04	.2853D+03	.2721D+03	.2421D+03	.2422D+03	.2422D+03
.5916D+04	.2820D+03	.2681D+03	.2399D+03	.2400D+03	.2400D+03
.6759D+04	.2774D+03	.2625D+03	.2380D+03	.2380D+03	.2381D+03
.7680D+04	.2675D+03	.2514D+03	.2365D+03	.2365D+03	.2365D+03
.8465D+04	.2622D+03	.2468D+03	.2369D+03	.2369D+03	.2369D+03

Tabla E.18 Resultados del archivo SALE8.OUT

T	AL(1)	AL(NANT)	AL(NBREAK)	AL(NDES)	AL(NN)
.5556D+00	.2875D-02	.2875D-02	.1043D-01	.2875D-02	.2875D-02
.4444D+01	.2875D-02	.2910D-02	.5591D-01	.2910D-02	.2875D-02
.1500D+02	.2875D-02	.4047D-02	.1674D+00	.4048D-02	.2875D-02
.3556D+02	.2875D-02	.1741D-01	.3468D+00	.1754D-01	.2875D-02
.6944D+02	.2875D-02	.9145D-01	.5139D+00	.1000D+00	.2875D-02
.1200D+03	.2875D-02	.2199D+00	.5894D+00	.2705D+00	.2877D-02
.1906D+03	.2875D-02	.3165D+00	.6602D+00	.3898D+00	.3171D-02
.2844D+03	.2875D-02	.4071D+00	.7189D+00	.4906D+00	.1322D-01
.4050D+03	.2875D-02	.4966D+00	.7682D+00	.5801D+00	.1000D+00
.5556D+03	.2875D-02	.5741D+00	.8067D+00	.6519D+00	.2418D+00
.7394D+03	.2937D-02	.6384D+00	.8385D+00	.7146D+00	.3911D+00
.9600D+03	.1017D-01	.6943D+00	.8698D+00	.7787D+00	.5597D+00
.1221D+04	.5911D-01	.7419D+00	.9008D+00	.8425D+00	.7207D+00
.1524D+04	.9943D-01	.7812D+00	.9312D+00	.9024D+00	.8519D+00
.1875D+04	.1545D+00	.8077D+00	.9569D+00	.9482D+00	.9347D+00
.2276D+04	.2208D+00	.8188D+00	.9722D+00	.9716D+00	.9698D+00
.2729D+04	.3072D+00	.8264D+00	.9789D+00	.9800D+00	.9800D+00
.3240D+04	.3967D+00	.8403D+00	.9809D+00	.9821D+00	.9822D+00
.3811D+04	.5049D+00	.8615D+00	.9826D+00	.9839D+00	.9839D+00
.4444D+04	.5876D+00	.8791D+00	.9841D+00	.9855D+00	.9855D+00
.5145D+04	.7092D+00	.9078D+00	.9867D+00	.9881D+00	.9881D+00
.5916D+04	.7923D+00	.9309D+00	.9884D+00	.9899D+00	.9899D+00
.6759D+04	.8616D+00	.9528D+00	.9897D+00	.9912D+00	.9912D+00
.7680D+04	.9344D+00	.9768D+00	.9907D+00	.9921D+00	.9922D+00
.8465D+04	.9544D+00	.9826D+00	.9905D+00	.9917D+00	.9919D+00

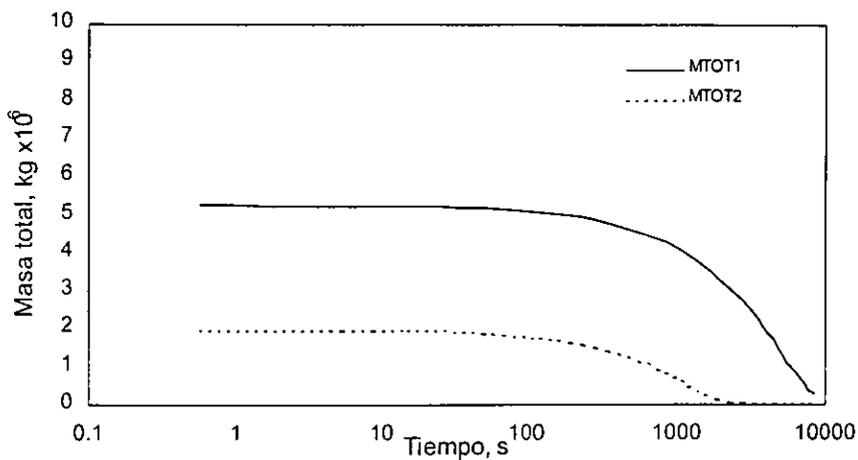


Figura E.8 Variación de la masa total en los extremos

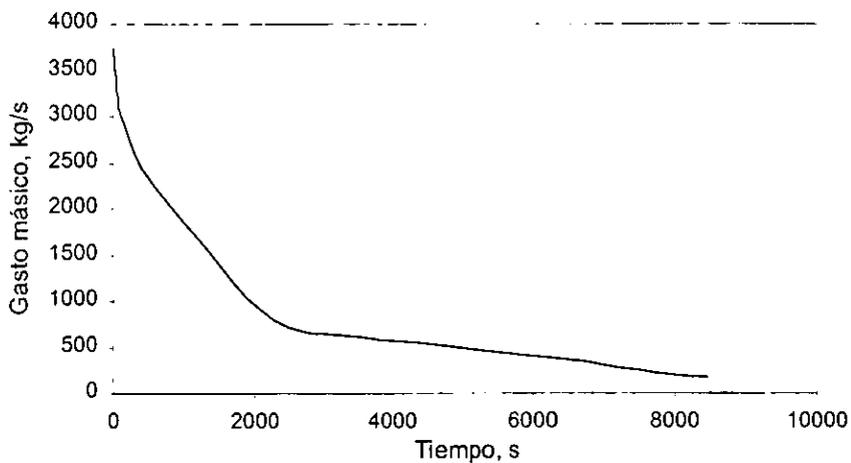


Figura E.9 Variación del gasto másico en la descarga

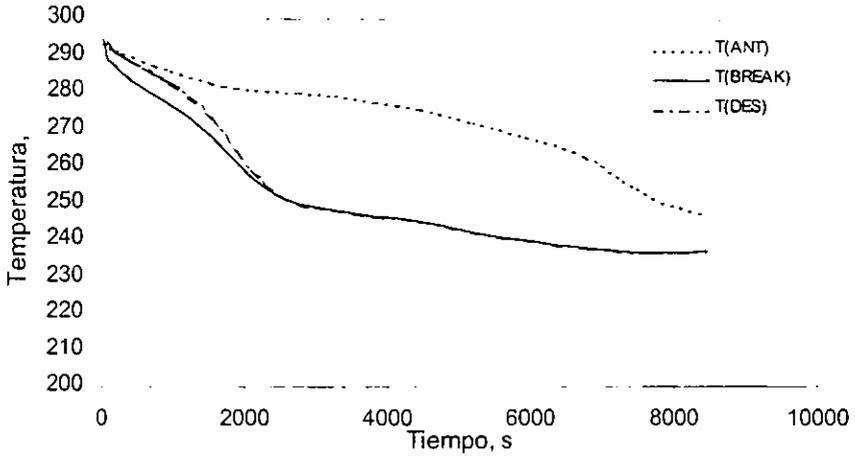


Figura E.10 Variación de la temperatura en la ruptura

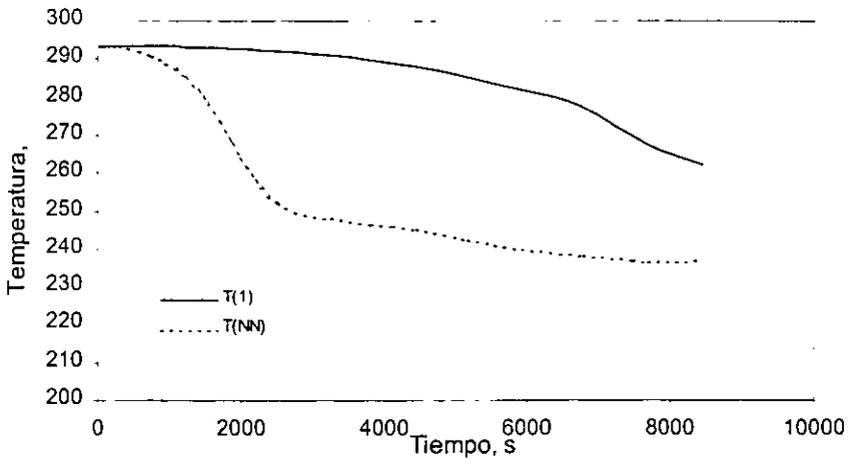


Figura E.11 Variación de la temperatura en los extremos

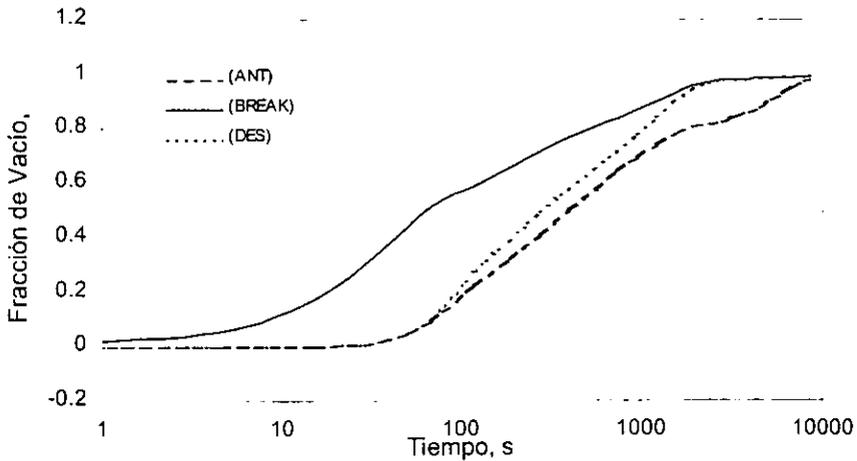


Figura E.12 Variación de la fracción de vacío en la ruptura

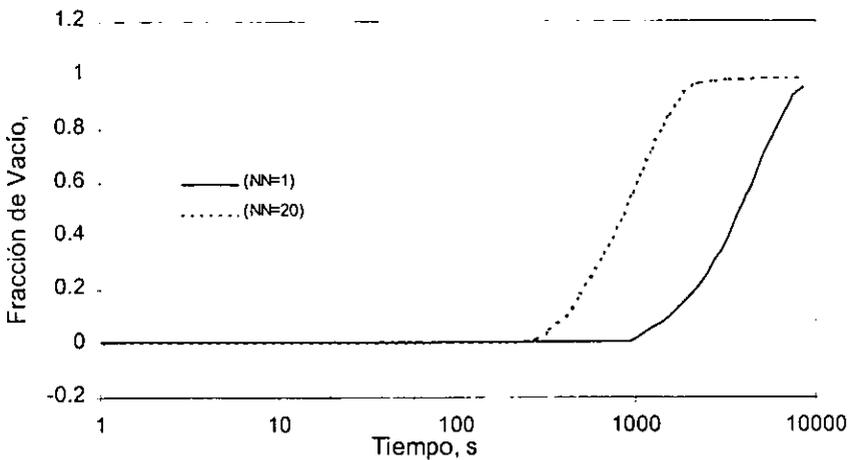


Figura E.13 Variación de la fracción de vacío en los extremos

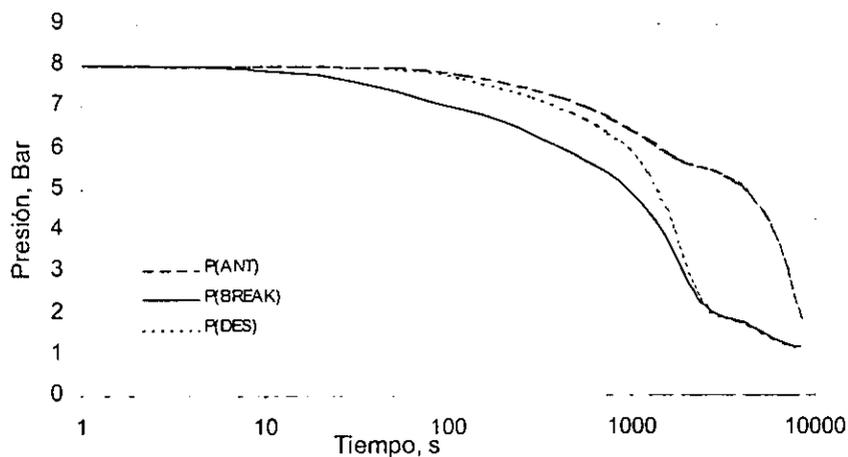


Figura E.14 Variación de la presión en la descarga

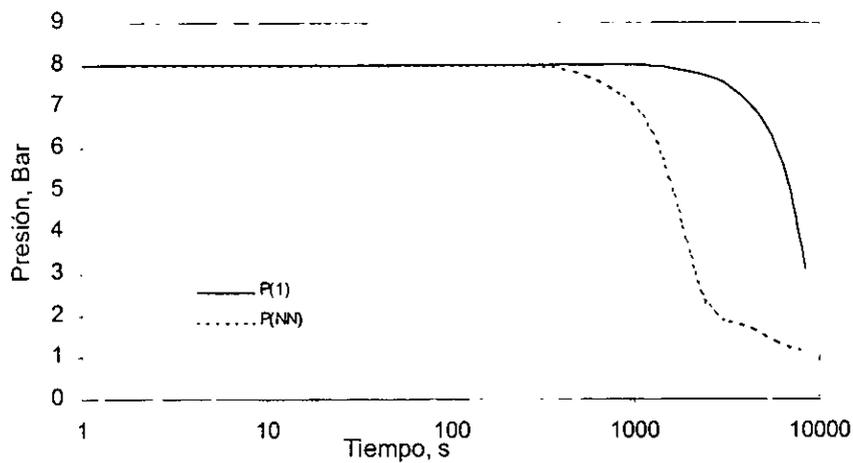


Figura E.15 Variación de la presión en los extremos

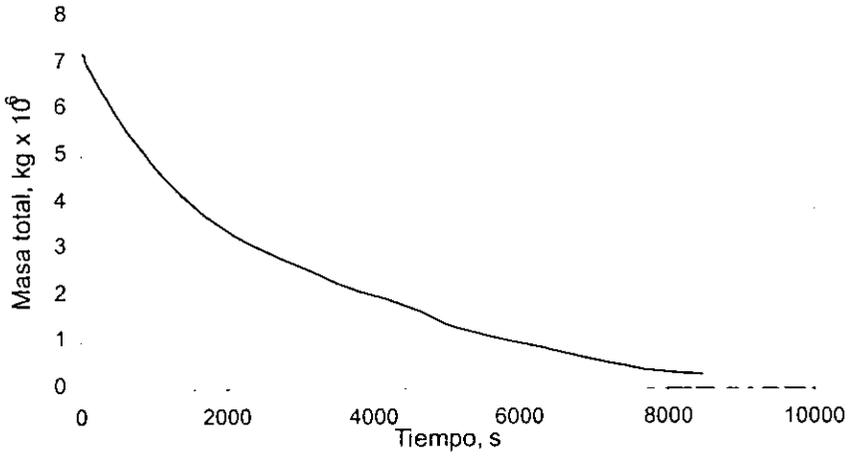


Figura E.16 Variación de la masa total en el ducto

Como ejemplo ilustrativo 3, se plantea la simulación de la descarga de un fluido multicomponente (condensado). En el distrito Reforma, específicamente, en las instalaciones superficiales del campo de Chiapas, se obtienen condensados del gas de alta presión, los cuales son enviados por un ducto hasta la batería de Girdaldas. Las características principales de esta línea se presentan en la Figura E.17. Se supone que existe una falla en un primer tramo de 5 km de la longitud total de la línea.

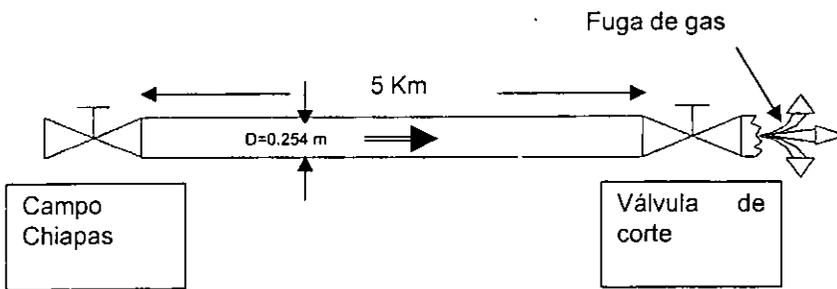


Figura E.17 Esquema simplificado de la línea Chiapas-Girdaldas

Este ejemplo es similar al ejemplo 2 del capítulo 5, en este ejercicio se presentan dos características diferentes, la primera, se propone una ruptura parcial, y la segunda, se estima el tiempo de duración del proceso muy corto. Para las demás variables involucradas en el ejercicio se mantienen iguales al ejemplo 2 del capítulo 5.

Las condiciones de operación y geometría del ducto simulado, así como la composición del fluido simulado se presentan en las Tablas E.19 y E.20, los parámetros necesarios para el simulador que describen la ubicación y tipo de ruptura, se pueden observar en la Tabla E.21.

Tabla E.19 Características de la línea Chiapas - Giraldas

Longitud	5,000 m
Diámetro	0.2540 m
Fluido	Condensado
Sitio de ruptura	En un extremo
Tipo de ruptura	Parcial

Tabla E.20 Composición del condensado

COMPUESTO	COMPOSICIÓN, % MOL
Metano	0.04
Etano	0.03
Propano	0.05
n-Butano	0.05
n-Pentano	0.06
Decano	0.53
Eicosano	0.21
Agua	0.03

Tabla E.21 Características de la ruptura

Numero de nodos	15
Malla uniforme (PWRZ)	1
Nodo de ruptura	20
Ruptura parcial (ALFA)	0.7

Con la información anterior, en primer lugar se definirán los datos de las variables que se encuentran incluidos en el listado del programa y posteriormente los datos de las variables que se encuentran en el archivo ENTRA3.DAT, a continuación se describen las instrucciones tal como se encuentran en el programa:

#### E.5 Datos de entrada incluidos en el listado del programa (ejemplo ilustrativo 3)

A continuación se describe la forma de cómo deben de escribirse los datos en el programa:

```
C.....
C          DATOS PARA EL CALCULO DEL EQUILIBRIO DE FASES
C.....
PARAMETER(NN=15)
.
.
C**** Declaración del número de componentes y estado de referencia:
      NC=8
      TREF=298.2D0
      PREF=1.0132503D0
      PI=3.141592D0

C**** Entrada de datos de propiedades de los componentes:
C      (SISTEMA DE UNIDADES= T/K, p/bar, R/[J/mol K], v/cm^3)

      R=8.314D0

C**** M E T A N O
      TC(1)=190.6D0
      PC(1)=45.99D0
      W (1)=0.012D0
      VCC(1)=98.60D0
      WSRK(1)=0.0074D0
      VA(1)=99.4D0
      QP(1)=0.00159D0
      HREF(1)=-7.490D+4
      GREF(1)=-5.087D+4
      CPA(1)=1.925D+1
      CPB(1)=5.213D-2
      CPC(1)=1.197D-5
      CPD(1)=-1.132D-8
      CPE(1)=0.0D0
      CPF(1)=0.0D0

C**** E T A N O
      TC(2) =305.42D0
      PC(2) =48.80D0
      W (2) =0.09781D0
      VCC(2) =148.0D0
      WSRK(2)=0.0983D0
      VA(2)=145.8D0
      QP(2) =-0.02669D0
      HREF(2)=-8.474D+4
      GREF(2)=-3.295D+4
      CPA(2)=5.409D0
      CPB(2)=1.781D-1
      CPC(2)=-6.938D-5
      CPD(2)=8.713D-9
      CPE(2)=0.0D0
      CPF(2)=0.0D0
```

## C\*\*\* P R O P A N O

TC(3) =369.82D0  
PC(3) =42.49D0  
W (3) =0.15416D0  
VCC(3) =200.0D0  
WSRK(3)=0.1532D0  
VA(3)=200.1D0  
QP(3) =-0.03136D0  
HREF(3)=-1.039D+5  
GREF(3)=-2.349D+4  
CPA(3)=-4.224D0  
CPB(3)=3.063D-1  
CPC(3)=-1.586D-4  
CPD(3)=3.215D-8  
CPE(3)=0.0D0  
CPF(3)=0.0D0

## C\*\*\* n-B U T A N O

TC(4) =425.18D0  
PC(4) =37.97D0  
W (4) =0.20096D0  
VCC(4) =255.0D0  
WSRK(4) =0.2008D0  
VA(4) = 254.4D0  
QP(4) =-0.03443D0  
HREF(4)=-1.262D+5  
GREF(4)=-1.610D+4  
CPA(4)=9.487D+0  
CPB(4)=3.313D-1  
CPC(4)=-1.108D-4  
CPD(4)=-2.822D-9  
CPE(4)=0.0D0  
CPF(4)=0.0D0

## C\*\*\*\* n-P E N T A N O

TC(5) =469.65D0  
PC(5) =33.55D0  
W (5) =0.2520D0  
VCC(5) =311.0D0  
WSRK(5)=0.2522D0  
VA(5)=311.3D0  
QP(5) =-0.03946D0  
HREF(5)=-1.465D+5  
GREF(5)=-8.360D+3  
CPA(5)=-3.626D+0  
CPB(5)=4.873D-1  
CPC(5)=-2.580D-4  
CPD(5)=5.305D-8  
CPE(5)=0.0D0  
CPF(5)=0.0D0

## C\*\*\*\* D E C A N O

TC(6) =617.65D0  
PC(6) =20.96D0  
W(6) =0.492D0  
VCC(6) =602.0D0  
WSRK(6)=0.4916D0  
VA(6) =491.6D0  
QP(6) =-0.04510D0  
HREF(6)=-2.498D+5  
GREF(6)=3.324D+4  
CPA(6)=-7.913D0  
CPB(6)=9.609D-1  
CPC(6)=-5.288D-4  
CPD(6)=1.131D-7  
CPE(6)=0.0D0  
CPF(6)=0.0D0

## C\*\*\*\* E I C O S A N O

TC(7) =767.15D0  
PC(7) =11.1D0  
W(7) =0.907D0  
VCC(7) =763.0D0  
WSRK(7)=0.9239D0  
VA(7)=1375.4D0  
QP(7) =0.0D0  
HREF(7)=+4.561D+5  
GREF(7)=+1.174D+5  
CPA(7)=-2.238D+1  
CPB(7)=1.939D0  
CPC(7)=-1.117D-3  
CPD(7)=2.528D-7  
CPE(7)=0.0D0  
CPF(7)=0.0D0

## C\*\*\*\* A G U A

TC(8) =647.1D0  
PC(8) =220.55D0  
W(8) =0.345D0  
VCC(8) =55.9D0  
QP(8) =0.06635D0  
HREF(8)=-2.42D+5  
GREF(8)=-2.288D+5  
CPA(8)=3.224D+1  
CPB(8)=1.924D-3  
CPC(8)=1.055D-5  
CPD(8)=-3.596D-9  
CPE(8)=0.0D0  
CPF(8)=0.0D0

C\*\*\* Parámetros de convergencia:

```
IEQ=2
IMAX=20
IWTE=3
FLG8=-0.6D0
FLG9= 5.D0
RT=0.0001D0
```

C\*\*\* Datos para el uso de la regla de van der Waals (1 parámetro):

C\*\*\* Para la ecuación de PR  $k_{ij}=k_{ji}=0.0033$

C

```
IRM=2
DO I=1,NC
DO J=1,NC
KO(I,J)=0D0
END DO
END DO
```

.

C\*\*\*\*\*  
C\*\* DATOS DE COMPOSICION DE LA MEZCLA Y PESO MOLECULAR  
C\*\*\*\*\*

```
ZC(1)=0.04
ZC(2)=0.03
ZC(3)=0.05
ZC(4)=0.05
ZC(5)=0.06
ZC(6)=0.53
ZC(7)=0.21
ZC(8)=0.03
MM(1)=16.043
MM(2)=30.07
MM(3)=44.09
MM(4)=58.12
MM(5)=72.15
MM(6)=142.28
MM(7)=282.556
MM(8)=18.0150
MMM=0.
DO I=1,NC
MMM=MMM+MM(I)*ZC(I)
END DO
```

.

IDL=1

Así, de esta forma se tendrán que aportar los datos para sistemas de más de dos componentes (multicomponentes), de la misma forma para el ejemplo 2 del capítulo 5.

## E.6 Datos transmitidos por el archivo de datos ENTRA3.DAT

A continuación se describe la forma de como crear la información del archivo ENTRA3.DAT, el cual describe el sistema a simular.

En el programa se encuentran estas tres instrucciones (OPEN, READ y FORMAT), las cuales le dicen al programa que los datos de las condiciones de operación, así como las del sistema que se va a simular se encuentran en el archivo ENTRA3.DAT.

```
OPEN (UNIT=1, FILE='entra3.dat', STATUS='UNKNOWN')
.
  READ (1, 2) D, LTOT, X0, P0, MBREAK, MIN, MOUT, PA, PWRZ, PWRT, TLAST, TATM
  *, THICK, CW, ROW, THM, ALFA, LSTEP
  2 FORMAT (2 (6D12.5/), 5D12.5/I3)
```

La forma en que se deben colocar los datos en el archivo ENTRA3.DAT es en forma de tabulación (ver Tabla E.22), además, la mayoría de los valores se deben de escribir en la forma de variable de doble precisión (ver Tabla E.23). Se presentan dos tablas, que representan la forma de ubicación de las variables, así como la manera en que se debe de escribir los valores, por ejemplo en la Tabla E.22 se presenta la ubicación de la variable D, el valor numérico para esta variable es.25400D+00, como se puede observar en la Tabla E.23.

Tabla E.22 Ubicación de las variables del archivo de datos ENTRA3.DAT

D	LTOT	XO	PO	MBREAK	MIN
MOUT	PA	PWRZ	PWRT	TLAST	TATM
THICK	CW	ROW	THM	ALFA	
LSTEP					

Tabla E.23 Valor numérico de las variables del archivo de datos ENTRA3.DAT

.25400D+00	.50000D+04	1.0000D-4	.75000D+06	.10000D-01	.00001D+00
.00001D+00	.10000D+06	.10000D+01	.30000D+01	.90000D+04	.29500D+03
.0016	.47300D3	.78010D+04	0.	.07D1	
30					

Si el usuario quiere simular un ducto con una ruptura menor a 70%, por ejemplo 30%, solo tiene que modificar el valor correspondiente a la variable ALFA del archivo ENTRA3.DAT, como se puede observa a continuación:

Tabla E.24 Modificación del valor numérico de la variable ALFA del archivo de datos ENTRA3.DAT

.25400D+00	.10000D+05	1.0000D-4	.80000D+06	.10000D-01	.00001D+00
.00001D+00	.10000D+06	.10000D+01	.30000D+01	.90000D+04	.29500D+03
.0016	.47300D3	.78010D+04	0.	.03D1	
30					

En este ejemplo se propuso una  $TLAST=9,000$  segundos, este valor estima que el proceso de descarga tendrá un periodo de duración igual o menor a los 9,000 segundos para este ejemplo ilustrativo 3, sin embargo este valor fue mal estimado, debido a que el periodo de duración de este proceso es mayor a los 9,000 segundos, en realidad tiene un periodo de duración de 15,000 segundos aproximadamente. Esta estimación errónea se hizo con el propósito de remarcar la importancia de la variable  $TLAST$  la cual se encarga de definir el tiempo de duración de un proceso de descarga.

A continuación se presentan los resultados que se obtienen de este ejemplo, Tablas E.25-E.28, además de anexarse los gráficos correspondientes, Figuras E.18-E.22. Tanto en los resultados como en los gráficos se puede observar que el proceso de descarga solo va a una 70% de su tiempo real de duración, en otras palabras, el tiempo de duración del proceso de descarga total de este ejemplo es de aproximadamente 1,300 segundos (22 minutos).

Con estos tres ejemplos ilustrativos presentados en este capítulo, el usuario, además de reproducirlos, podrá generar algunas otras variantes, así como la creación de otros ejemplos.

Tabla E.25 Resultados del archivo SALE9.OUT

T	MTOT	MOUT	PCR
.3333D-01	.1814D+06	.5204D+03	.4509D+06
.2667D+00	.1813D+06	.5138D+03	.4461D+06
.9000D+00	.1809D+06	.4950D+03	.4327D+06
.2133D+01	.1803D+06	.4630D+03	.4097D+06
.4167D+01	.1794D+06	.4179D+03	.3767D+06
.7200D+01	.1782D+06	.3707D+03	.3422D+06
.1143D+02	.1768D+06	.3281D+03	.3100D+06
.1707D+02	.1750D+06	.2872D+03	.2784D+06
.2430D+02	.1730D+06	.2496D+03	.2487D+06
.3333D+02	.1709D+06	.2187D+03	.2235D+06
.4437D+02	.1687D+06	.1908D+03	.2003D+06
.5760D+02	.1662D+06	.1674D+03	.1803D+06
.7323D+02	.1638D+06	.1494D+03	.1645D+06
.9147D+02	.1612D+06	.1345D+03	.1511D+06
.1125D+03	.1585D+06	.1226D+03	.1399D+06
.1365D+03	.1556D+06	.1132D+03	.1311D+06
.1638D+03	.1527D+06	.1059D+03	.1242D+06
.1944D+03	.1493D+06	.9930D+02	.1178D+06
.2286D+03	.1460D+06	.9419D+02	.1128D+06
.2667D+03	.1424D+06	.8947D+02	.1077D+06
.3087D+03	.1389D+06	.8577D+02	.1040D+06
.3549D+03	.1349D+06	.8191D+02	.1002D+06
.4056D+03	.1310D+06	.7832D+02	.9666D+05
.4608D+03	.1269D+06	.7493D+02	.9328D+05
.5208D+03	.1224D+06	.7144D+02	.8976D+05
.5859D+03	.1176D+06	.6790D+02	.8613D+05
.6561D+03	.1127D+06	.6443D+02	.8229D+05
.7317D+03	.1077D+06	.6095D+02	.7885D+05
.8130D+03	.1000D+06	.5596D+02	.7350D+05
.9000D+03	.9643D+05	.5351D+02	.7035D+05

Tabla E.26 Resultados del archivo SALE10.OUT

T	Y(1)	Y(NN)
.3333D-01	.7250D+06	.7238D+06
.2667D+00	.7250D+06	.7156D+06
.9000D+00	.7250D+06	.6940D+06
.2133D+01	.7250D+06	.6551D+06
.4167D+01	.7250D+06	.6004D+06
.7200D+01	.7250D+06	.5384D+06
.1143D+02	.7250D+06	.4806D+06
.1707D+02	.7250D+06	.4295D+06
.2430D+02	.7250D+06	.3823D+06
.3333D+02	.7250D+06	.3397D+06
.4437D+02	.7250D+06	.3029D+06
.5760D+02	.7250D+06	.2719D+06
.7323D+02	.7250D+06	.2464D+06
.9147D+02	.7250D+06	.2257D+06
.1125D+03	.7242D+06	.2094D+06
.1365D+03	.7154D+06	.1961D+06
.1638D+03	.7007D+06	.1852D+06
.1944D+03	.6899D+06	.1761D+06
.2286D+03	.6768D+06	.1683D+06
.2667D+03	.6620D+06	.1617D+06
.3087D+03	.6457D+06	.1555D+06
.3549D+03	.6282D+06	.1496D+06
.4056D+03	.6094D+06	.1437D+06
.4608D+03	.5897D+06	.1383D+06
.5208D+03	.5692D+06	.1330D+06
.5859D+03	.5481D+06	.1278D+06
.6561D+03	.5265D+06	.1226D+06
.7317D+03	.5048D+06	.1174D+06
.8130D+03	.4827D+06	.1122D+06
.9000D+03	.4606D+06	.1068D+06

Tabla E.27 Resultados del archivo SALE11.OUT

T	TN(1)	TN(NN)
.3333D-01	.2813D+03	.2813D+03
.2667D+00	.2813D+03	.2813D+03
.9000D+00	.2813D+03	.2813D+03
.2133D+01	.2813D+03	.2812D+03
.4167D+01	.2813D+03	.2811D+03
.7200D+01	.2813D+03	.2809D+03
.1143D+02	.2813D+03	.2808D+03
.1707D+02	.2813D+03	.2806D+03
.2430D+02	.2813D+03	.2805D+03
.3333D+02	.2813D+03	.2803D+03
.4437D+02	.2813D+03	.2802D+03
.5760D+02	.2813D+03	.2801D+03
.7323D+02	.2813D+03	.2800D+03
.9147D+02	.2813D+03	.2799D+03
.1125D+03	.2813D+03	.2798D+03
.1365D+03	.2813D+03	.2797D+03
.1638D+03	.2813D+03	.2796D+03
.1944D+03	.2812D+03	.2795D+03
.2286D+03	.2812D+03	.2794D+03
.2667D+03	.2812D+03	.2794D+03
.3087D+03	.2812D+03	.2793D+03
.3549D+03	.2811D+03	.2792D+03
.4056D+03	.2811D+03	.2791D+03
.4608D+03	.2810D+03	.2791D+03
.5208D+03	.2810D+03	.2790D+03
.5859D+03	.2809D+03	.2789D+03
.6561D+03	.2809D+03	.2788D+03
.7317D+03	.2808D+03	.2787D+03
.8130D+03	.2807D+03	.2785D+03
.9000D+03	.2807D+03	.2784D+03

Tabla E.28 Resultados del archivo SALE12.OUT

T	AL(1)	AL(NN)
.3333D-01	.1535D-02	.3325D-02
.2667D+00	.1535D-02	.1327D-01
.9000D+00	.1535D-02	.4167D-01
.2133D+01	.1535D-02	.9121D-01
.4167D+01	.1535D-02	.1631D+00
.7200D+01	.1535D-02	.2429D+00
.1143D+02	.1535D-02	.3173D+00
.1707D+02	.1535D-02	.3928D+00
.2430D+02	.1535D-02	.4653D+00
.3333D+02	.1535D-02	.5274D+00
.4437D+02	.1535D-02	.5854D+00
.5760D+02	.1535D-02	.6353D+00
.7323D+02	.1535D-02	.6747D+00
.9147D+02	.1556D-02	.7080D+00
.1125D+03	.2577D-02	.7339D+00
.1365D+03	.1381D-01	.7556D+00
.1638D+03	.3075D-01	.7723D+00
.1944D+03	.4494D-01	.7876D+00
.2286D+03	.6083D-01	.7994D+00
.2667D+03	.7974D-01	.8099D+00
.3087D+03	.9850D-01	.8186D+00
.3549D+03	.1218D+00	.8282D+00
.4056D+03	.1447D+00	.8366D+00
.4608D+03	.1690D+00	.8444D+00
.5208D+03	.1965D+00	.8525D+00
.5859D+03	.2263D+00	.8606D+00
.6561D+03	.2570D+00	.8685D+00
.7317D+03	.2888D+00	.8764D+00
.8130D+03	.3375D+00	.8879D+00
.9000D+03	.3605D+00	.8937D+00

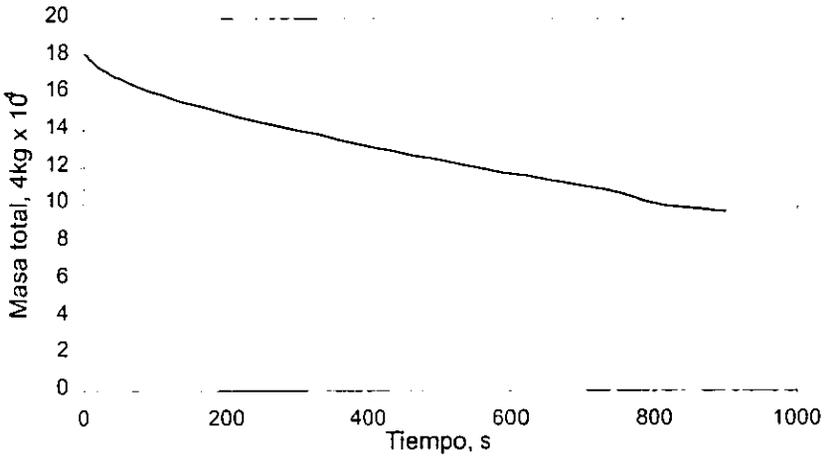


Figura E.18 Variación de la masa total en el ducto

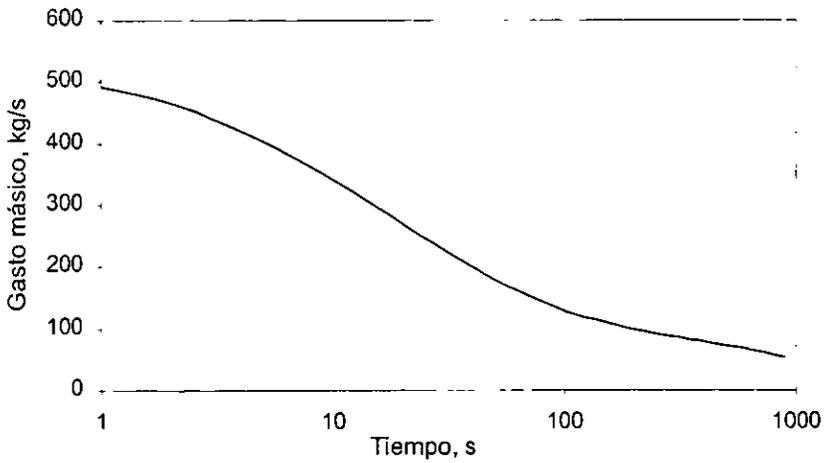


Figura E.19 Variación del gasto másico en la ruptura

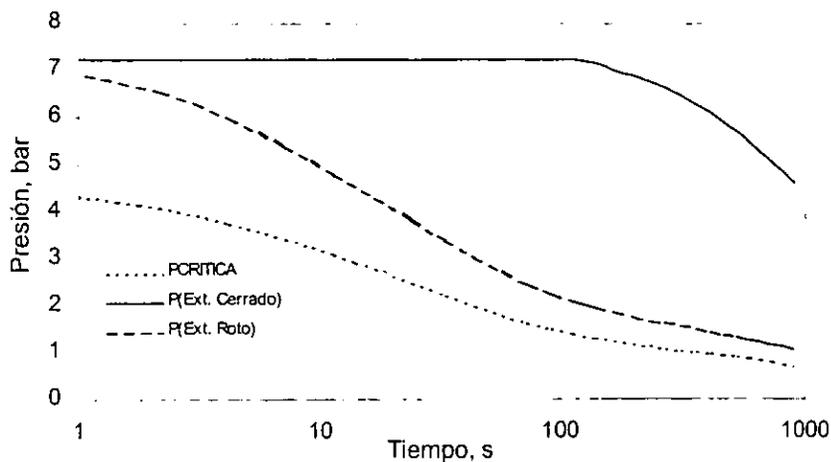


Figura E.20 Variación de la presión en los extremos

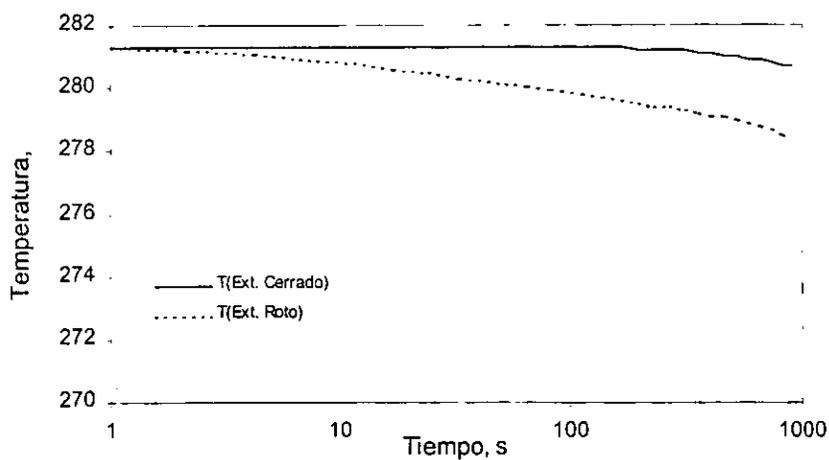


Figura E.21 Variación de la temperatura en los extremos

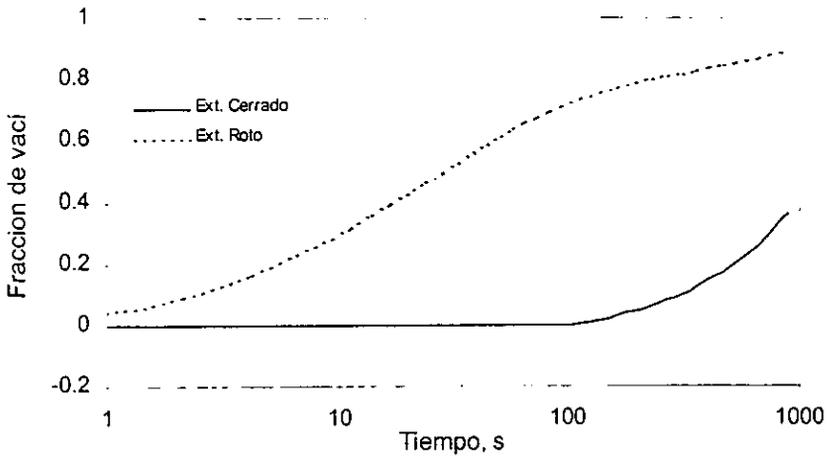


Figura E.22 Variación de la fracción de vacío en los extremos

---

---

## BIBLIOGRAFÍA

1. A.J.F. Barragán, "Desarrollo de Programas de Cálculo de Equilibrio de Fases en Sistemas Multicomponentes", Tesis de Maestría, Facultad de Química, UNAM, 1995.
2. D. Barnea, "A Unified Model for Predicting Flow Pattern Transitions for the Whole Range of Pipe Inclinations", *Int. J. Multiphase Flow* 13, No.1, 1987, 1-12.
3. D. Barnea, "Transition From Annular Flow and From Dispersed Bubble Flow Unified Models for the Whole Range of Pipe Inclinations", *Int. J. Multiphase Flow* 12, No. 5, 1986, 733-744.
4. D. Barnea, et. al., "Gas Liquid Flow in Inclined Tubes: Flow Pattern Transition for Upward Flow", *Chem. Eng. Sci.* 40, 1985, 131-136.
5. D. Barnea, O. Shoham & Y. Taitel, "Flow Pattern Transition for Downward Inclined Two-Phase Flow: Horizontal to Vertical", *Chem. Eng. Sci.* 37, 1982, 735-740.
6. D. Barnea, O. Shoham & Y. Taitel, "Flow Pattern Transition for Vertical Downward Two-Phase Flow", *Chem. Eng. Sci.* 37, 1982, 741-746.
7. K.H. Bendiksen, et. al., "The dynamic Two-Fluid Model Olga: Theory and Application", *SPE* May. 1991, 171-80.
8. Bergles, A.E., Collier, J.G., Hewitt, G.F., "Two-Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries", Hemisphere Publishing Corporation, 1981.
9. J.P. Brill, "Multiphase Flow in Wells", *JPT*, Jan. 1987, 15-21.
10. J.P., "A state of the art in Multiphase Flow", *Journal Petroleum Technology*, May 1992.
11. K.K. Botros, W.M. Jungowski, & M.H. Weiss, "Models and Methods of Simulating Gas Pipeline Blowdown", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 67, August 1989.
12. R. Camacho, "Apuntes del Curso de Modelos Mecánicos", Maestría en Ingeniería Petrolera, Instituto de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNAM.

13. Castellan, G.W., "Fisicoquímica", Ed. Iberoamericana, 1987.
14. Chen, J.R., Richardson, S.M. & Saville, G., "Modelling of Two-Phase Blowdown from Pipelines-I. A Hyperbolic Model Based on Variational Principles", *Chemical Engineering Science*, 50, 695-713, 1995a.
15. Chen, J.R., Richardson, S.M. & Saville, G., "Modelling of Two-Phase Blowdown from Pipelines-II. A Simplified Numerical Method for Multi-Component Mixtures", *Chemical Engineering Science*, 50, 2173-2187, 1995b.
16. Chisholm, D., "Two-Phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers", George Godwin, 1983.
17. A.E. DeGance & R.W. Atherton, "Chemical Engineering Aspects of Two-Phase Flow", *Chemical Engineering*, part 1-8, 23 March 1970 – 22 February 1971.
18. H. Dhulesia & D. López, "Critical Evaluation of Mechanistic Two-Phase Flow Pipeline and Well Simulation Models", *SPE 36611*, 1996, 393-402.
19. A.E. Dukler & M.G. Hubbard, "A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes", *Ind. Eng. Chem. Fund.*, vol 14, 1975, 337-47.
20. V.Y. Fairuzov, A.J. Erosa & M.A. Rosas, "The Influence of Heat Transfer on Two-Phase Flow Behavior During Pipeline Blowdown", *Proceedings of the ASME Fluids, FED-Vol. 242*, 1996.
21. V.Y. Fairuzov, "Blowdown of Pipelines Carrying flashing Liquids", *AIChE Journal*, vol. 44, No. 2, February 1998.
22. V.Y. Fairuzov, G.V. López, M.A. Rosas, "Desarrollo de un Código Computarizado para la Simulación Dinámica de Fugas y Evaluación de Eventos Asociados en la Ruptura de Ductos de Transporte de Hidrocarburos", *Proyecto FIES 96-29-IV, IMP, Informe Final, Marzo de 1999*.
23. N.F. Fuentes, "Desarrollo de Correlaciones Híbridas para Flujo Multifásico en Tuberías", *Tesis, Maestría en Ingeniería Petrolera, UNAM, 1990*.
24. C.B. Goh, "Estimation of Flowrate Through a Ruptured Natural Gas Pipe", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 10, No. 2, June 1989.
25. M.A. Grohmes, J.C. Leung & H.K. Fauske, "Transient Two-Phase Flow Discharge of Flashing Liquids Following a Break in a Long Transmission Pipe Line", *A.E. Bergles*.

26. J.C. Leung & M.A. Grolmes, "The Discharge of Two-Phase Flashing Flow in a Horizontal Duct", *AIChE Journal*, Vol. 33, No. 3, March 1987.
27. R.J. Mckee, "Simplified Blowdown", *Pipeline & Gas Journal*, March 1990.
28. T.B. Morrow, R.L. Bass, & J.A. Lock, "An LPG Pipeline Break Flow Model".
29. H.L. Norris, "Single-Phase or Multiphase Blowdown of Vessels or Pipelines", *SPE* 26565, 1993.
30. S.M. Richardson & G. Saville, "Blowdown of Pipelines", *SPE* 23070, 1991.
31. Y. Taitel, D. Barnea & A.E. Dukler, "Modeling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes", *AIChE J.*, May. 1980, 345-54.
32. Y. Taitel & A.E. Dukler, "A Model for Predicting Flow Regimen Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow", *AIChE J.*, vol. 22, No. 1, 1976, 47-55.
33. Y. Taitel, O. Shoham & J.P. Brill, "Transient Two-Phase Flow in Low Velocity Hilly Terrain Pipelines", *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 16, No. 1, 1990, 69-77.
34. Y. Taitel, U. Tel-Aviv, "Advances in Two-Phase Flow Modeling", *SPE* 27959, 1994, 33-52.
35. Y. Taitel, U. Tel-Aviv, "Advances in Two-Phase Flow Modeling", *SPE* 27959.
36. V.H.Y. Tam & L.T. Cowley, "Consequences of Pressurised LPG Release -A Full- Scale Experiment".
37. V.H.Y Tam & Higis, "Simple Transient Release Model of Pressurized Liquid Petroleum Gas From Pipelines".
38. UNEP, "Management of Industrial Accident Prevention and Preparedness", <http://www.unep.org/unep/regoffs/r...Materials/Accidents>.
39. Wallis, G.B., "One-Dimensional Two-Phase Flow", McGraw-Hill, 1969.