



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

OPTIMIZACION DEL DISEÑO DE LA RED DE TUBERÍA DEL
SISTEMA DE RELEVO DE PRESION A REGIMEN
PERMANENTE E ISOTÉRMICO DE UNA PLANTA
HIDRODESULFURADORA DE NAFTAS EMPLEANDO
ALGORITMOS GENETICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

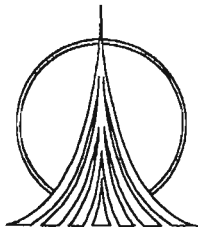
INGENIERO QUIMICO

PRESENTAN

IMELDA MARTÍNEZ ROMERO
DANIEL RODRÍGUEZ MONTERO

DIRECTOR

M. EN C. VICTOR HUGO VILLAR MARÍN



FEBRERO DEL 2005

m601467



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/052/04

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: RODRÍGUEZ MONTERO DANIEL

P r e s e n t e .

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

Presidente	I.Q. Eduardo Vázquez Zamora
Vocal	M. en C. Víctor Hugo Villar Marín
Secretario	I.Q. Gabriel Cruz Zepeda
Suplente	I.Q.I. Concepción G. Noroña Venegas
Suplente	I.Q. Dominga Ortiz Bautista

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

México, D.F., 3 de Noviembre de 2004.

EL JEFE DE LA CARRERA

M. en C. ANDRES AQUINO CANCHOLA

RECIBIDO EN LA SECRETARIA DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/051/04

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNA: MARTÍNEZ ROMERO IMELDA

P r e s e n t e .

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

Presidente	I.Q. Eduardo Vázquez Zamora
Vocal	M. en C. Víctor Hugo Villar Marín
Secretario	I.Q. Gabriel Cruz Zepeda
Suplente	I.Q.I. Concepción G. Noroña Venegas
Suplente	I.Q. Dominga Ortiz Bautista

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

México, D.F., 3 de Noviembre de 2004.

EL JEFE DE LA CARRERA

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M. en C. Andrés Aquino Canchola'.

M. en C. ANDRES AQUINO CANCHOLA

AGRADECIMIENTOS

IMELDA

- A Dios: Por ser el camino recto y único para lograr todas mis metas.
- A mis padres: Por todas las grandes cosas que me han enseñado y que sigo aprendiendo con ustedes, y el gran cariño y amor con que me han enseñado a enfrentar la vida.
- A mis abuelos: Por el inmenso apoyo que con gran cariño y amor me han brindado para seguir adelante.
- A mis hermanas: Por todos los momentos que he compartido con ustedes y el apoyo recibido.
- A mi asesor: Por el gran entusiasmo, apoyo y guía para alcanzar una de mis metas más grandes en la vida.
- A Daniel: Por estar siempre a mi lado brindándome su amor tan especial para mí.
- A mis amigos: Por todos los buenos deseos para alcanzar mis metas y la comprensión que me brindaron sin pedir nada a cambio.
- A mi Universidad: Por ser la base de mi superación profesional.
-

AGRADECIMIENTOS

DANIEL

- A Dios: Porque gracias a él he podido lograr lo que ahora soy y siempre a iluminado mi camino, sin él no estaría completo y con el quiero continuar el resto de mi vida.
- A mis padres: Por todo el amor que me han dado, por todo su apoyo en las cosas que he emprendido y por darme ánimos para enfrentar los problemas y educarme con el mejor ejemplo mil gracias.
- A mis hermanos: Gracias por confiar en mí y darme su apoyo así como ánimos para continuar.
- A mi Asesor: Ing. Víctor Villar Marín gracias por su paciencia y disposición para ayudarme a dar un gran paso en mi camino.
- A Imelda: Imelda, gracias por ser el mejor apoyo en esta etapa de mi vida, gracias por darme tu amor y comprensión, que son la energía que necesito para seguir adelante.
- A mis profesores: Ya que gracias a ellos tengo las bases para enfrentar los problemas que se presenten en mi vida profesional.
- A mis Amigos: Gracias por los buenos deseos y por brindarme su amistad de forma incondicional.
- A la UNAM: Por brindarme la oportunidad de estudiar y formarme como profesionista.
-

OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE TUBERÍAS DEL SRP MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS.



INDICE

LISTA DE FIGURAS		vii
LISTA DE TABLAS		x
RESUMEN		xi
INTRODUCCIÓN		xii
CAPITULO 1. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE RELEVO DE PRESIÓN.		1
1.1.	Aspectos teóricos del Sistema de Relievo de Presión.	1
	Definición de un Sistema de Relievo de Presión (SRP).	1
1.1.1		1
1.1.1.1.	Capas de protección.	1
1.1.1.2.	Partes constituyentes de un SRP.	3
	Requerimientos de un Sistema de Relievo de Presión.	4
1.1.1.3.		4
1.1.1.4.	Tipos de Sistemas de Relievo de Presión.	5
1.1.1.4.1.	Sistema de Relievo de Presión Abierto.	5
1.1.1.4.2.	Sistema de Relievo de Presión Cerrado.	6
1.1.1.4.3.	Sistema de Relievo de Presión con Recuperación.	6
1.1.1.5.	Terminología y conceptos.	7
1.1.1.5.1.	Presión de Ajuste.	7
1.1.1.5.2.	Presión de Diseño.	7
1.1.1.5.3.	Sobrepresión.	7
1.1.1.5.4.	Acumulación.	7
1.1.1.5.5.	Contrapresión.	7
	Contrapresión Desarrollada (Build-up back pressure).	8
1.1.1.5.6.		8
1.1.1.5.7.	Contrapresión Superimpuesta.	8
1.1.1.5.8.	Máxima Presión de Trabajo Permisible.	8
1.1.1.5.9.	Condiciones de Relievo.	8
1.1.1.5.10.	Válvula de Relievo de Presión Balanceada.	8
1.1.1.5.11.	Válvula de Relievo de Presión Convencional.	8
1.1.2.	Dispositivos de Relievo de Presión (DRP).	8
1.1.2.1.	Tipos de Dispositivos de Relievo de Presión.	9
1.1.2.1.1.	Válvula de Relievo.	9
1.1.2.1.2.	Válvula de Seguridad.	9
1.1.2.1.3.	Válvula de Seguridad-Relievo.	9
1.1.2.1.4.	Válvula de Relievo de Presión Convencional.	9
1.1.2.1.5.	Válvula de Relievo de Presión Balanceada.	10
1.1.2.1.6.	Válvula de Relievo de Presión Operada por Piloto.	11

1.1.2.1.7.	Disco de Ruptura.	12
1.1.2.2.	<i>Causas de Relevo de Presión.</i>	12
1.1.2.3.	<i>Dimensionamiento de Dispositivos de Relevo de Presión.</i>	16
1.1.2.3.1.	Presión de Ajuste.	16
1.1.2.3.2.	Temperatura de Relevo.	17
1.1.2.3.3.	Sobrepresión.	17
1.1.2.3.4.	Área de Flujo Requerida	18
<i>1.1.2.3.4.1.</i>	<i>Dimensionamiento para Flujo Crítico.</i>	18
<i>1.1.2.3.4.2.</i>	<i>Dimensionamiento para Flujo Subcrítico: Gas o Vapor.</i>	22
<i>1.1.2.3.4.2.1.</i>	PSV convencional y operada por piloto.	22
<i>1.1.2.3.4.2.2.</i>	PSV Balanceadas.	23
<i>1.1.2.3.4.3.</i>	<i>Dimensionamiento para relevo de líquido: PSV que requieren certificación de capacidad.</i>	23
<i>1.1.2.3.4.4.</i>	<i>Dimensionamiento para relevo de líquido: PSV que no requiere certificación de capacidad.</i>	25
1.1.2.3.5.	Determinación de los Orificios Nominales.	26
1.1.2.3.6.	Boquillas de Entrada y Salida.	27
1.1.2.3.7.	Diseño de los Dispositivos de Disco de Ruptura.	27
<i>1.1.2.3.7.1.</i>	<i>Dispositivos de Disco de Ruptura Independientes.</i>	28
<i>1.1.2.3.7.2.</i>	<i>Dispositivos de Discos de Ruptura usados en combinación con las Válvulas de Relevo de Presión.</i>	29
1.1.3.	Dimensionamiento del cabezal del SRP.	29
1.1.3.1.	<i>Criterios de Diseño.</i>	29
1.1.3.1.1.	Tubería de entrada al Dispositivo de Relevo de Presión.	30
1.1.3.1.2.	Requerimientos del Cabezal de Relevo.	30
1.1.3.1.3.	Factores que Afectan el Diseño del Cabezal de Relevo.	30
<i>1.1.3.1.3.1.</i>	<i>Distribución Física de la Planta.</i>	30
<i>1.1.3.1.3.2.</i>	<i>Proceso que se lleva a cabo.</i>	30
<i>1.1.3.1.3.3.</i>	<i>Máxima Descarga Simultánea a los Cabezales.</i>	30
<i>1.1.3.1.3.4.</i>	<i>Máxima Caída de Presión Disponible.</i>	31
<i>1.1.3.1.3.5.</i>	<i>Condiciones Sónicas.</i>	31
1.1.3.2.	Modelo Matemático.	32
1.1.3.2.1.	Método de Conison.	34
1.1.3.2.2.	Método de Missen.	35
1.1.3.2.3.	Método de Mak.	36
CAPITULO 2. ASPECTOS TEÓRICOS DE LA OPTIMIZACIÓN.		38
2.1.	Metodologías para la Optimización.	38

2.1.1.	Conceptos.	38
2.1.2.	Requerimientos para la Aplicación de Métodos de Optimización.	40
2.1.2.1.	<i>Restricciones de Igualdad</i>	40
2.1.2.2.	<i>Restricciones de Desigualdad.</i>	40
2.1.2.3.	<i>Restricciones Discretas.</i>	41
2.1.2.4.	<i>Restricciones de Regiones separadas.</i>	41
2.1.2.5.	<i>Optimo Global y Optimo Local.</i>	42
2.1.2.6.	<i>Concavidad y Convexidad</i>	43
2.1.2.7.	<i>Función de Lagrange.</i>	45
2.1.2.8.	<i>Función de Lagrange y Dualidad</i>	46
2.1.2.8.1.	<i>Punto Silla (Saddle Point).</i>	46
2.1.3.	Condiciones de Optimalidad.	48
2.1.3.1.	<i>Minimización no Restringsida.</i>	48
2.1.3.2.	<i>Minimización con Igualdades.</i>	49
2.1.3.3.	<i>Minimización con Igualdades y Desigualdades.</i>	50
2.1.4.	Métodos de Optimización.	52
2.1.4.1.	<i>Programación Lineal.</i>	52
2.1.4.2.	<i>Programación Lineal Mixta Entera.</i>	53
2.1.4.3.	Programación no Lineal.	56
2.1.4.4.	<i>Programación no Lineal Entera Mixta.</i>	56
2.2.	<i>Algoritmos Genéticos.</i>	57
2.2.1.	Introducción.	57
2.2.1.1.	<i>Antecedentes.</i>	57
2.2.1.2.	<i>Algoritmos Genéticos.</i>	59
2.2.1.2.1.	Codificación del dominio.	59
2.2.1.2.2.	Evaluación de la población.	60
2.2.1.2.3.	Selección.	61
2.2.1.2.4.	Cruzamiento.	62
2.2.1.2.5.	Mutación.	62
2.2.1.2.6.	Parámetros y Criterios de Parada.	62
2.2.1.2.7.	El Algoritmo Genético Simple (AGS).	63
2.2.2.	Fundamentos Matemáticos de los Algoritmos Genéticos.	66
2.2.2.1.	<i>Terminología.</i>	66
2.2.2.1.1.	Función de adaptación.	66

2.2.2.1.2.	Esquemas.	67
2.2.2.2.	<i>El Teorema del Esquema.</i>	67
2.2.2.2.1.	Análisis del Efecto de Selección.	68
2.2.2.2.2.	Análisis del Efecto de Cruzamiento.	69
2.2.2.2.3.	Análisis del Efecto de Mutación.	70
2.2.2.2.4.	Tipos de cruzamiento.	70
<i>2.2.2.2.4.1.</i>	<i>Cruzamiento de un punto.</i>	71
<i>2.2.2.2.4.2.</i>	<i>Cruzamiento de dos puntos.</i>	72
<i>2.2.2.2.4.3.</i>	<i>Cruzamiento uniforme.</i>	72
2.2.2.3.	<i>Críticas.</i>	73
2.2.2.4.	<i>Paralelismo Implícito y la HBC.</i>	73
2.2.3.	Variaciones en el AGS.	74
2.2.3.1.	<i>Codificación del dominio.</i>	75
2.2.3.1.1.	Codificación en punto fijo.	75
2.2.3.1.2.	Codificación binaria pesada.	76
2.2.3.1.3.	Codificación binaria de Gray.	76
2.2.3.1.4.	Codificación en punto flotante.	76
2.2.3.2.	<i>Tres Algoritmos a partir del AGS.</i>	76
CAPÍTULO 3.	ESTRUCTURA Y ALGORITMO PARA LA EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE RELEVO DE PRESIÓN CONSIDERANDO REGIMEN PERMANENTE E ISOTÉRMICO.	80
3.1.	<i>Enfoques de la Optimización de la Red de Tubería del SRP.</i>	80
3.1.1.	Modelo de Optimización Utilizando Programación Lineal.	80
3.1.1.1.	<i>Modelo de Optimización.</i>	81
3.1.1.1.1.	Formulación Convencional.	81
3.1.1.1.2.	Formulación propuesta.	82
3.1.2.	Modelo de Optimización de Programación No Lineal.	84
3.1.2.1.	<i>Planteamiento del Diseño del Cabezal de Relevo. Formulación Fundamental del Problema de Optimización.</i>	84
3.1.2.2.		86
3.1.2.3.	<i>Conceptos Considerados de la Teoría de Dualidad.</i>	89
3.1.2.4.	<i>Formulación del Problema Dual.</i>	91
3.1.2.5.	<i>Conclusiones.</i>	97
3.1.3.	Modelo de Optimización Utilizando Algoritmos Genéticos.	98
3.1.3.1.	<i>Formulación del Problema.</i>	98

3.1.3.2.	<i>Método de Optimización.</i>	99
3.1.3.2.1.	Codificación.	99
3.1.3.2.2.	Evaluación de aptitud.	100
3.1.3.2.3.	Población inicial.	101
3.1.3.2.4.	Reproducción.	101
3.1.3.2.5.	Cruzamiento.	101
3.1.3.2.6.	Mutación.	102
3.1.3.2.7.	Escalamiento de la Aptitud.	102
3.1.3.2.8.	Subpoblación reproductiva.	103
3.1.3.3.	<i>Resultados Obtenidos.</i>	103
3.1.3.3.1.	Predisposición a la Mutación.	103
3.1.3.3.2.	El escalamiento de Aptitud y la Subpoblación Reproductiva.	104
3.1.4.	Comentarios.	
3.2.	<i>Algoritmo Para el Dimensionamiento de la Red de Tubería del SRP.</i>	105
3.2.1.	Secuencia de cálculo en redes de SRP.	108
3.2.2.	Balance de Materia y Energía del SRP.	111
	<i>Evaluación de Propiedades en Mezclas de Corrientes</i>	
	<i>(46).</i>	111
3.2.2.1.	Flujo másico.	111
3.2.2.1.1.	Flujo molar total.	111
3.2.2.1.2.	Peso Molecular.	112
3.2.2.1.3.	Capacidad calorífica.	112
3.2.2.1.4.	Relación de Calores específicos.	112
3.2.2.1.5.	Presión crítica.	112
3.2.2.1.6.	Temperatura crítica.	112
3.2.2.1.7.	Entalpía.	112
3.2.2.1.8.	Entropía.	113
3.2.2.1.9.	Fracción molar.	113
3.2.2.1.10.	Viscosidad.	113
3.2.2.1.11.		
3.2.3.	Establecer Perfil de Temperaturas.	114
3.2.3.1.	<i>Evaluación de la expansión isoentálpica de un fluido compresible. (Cálculos con el coeficiente de Joule-Thompson constante).</i>	114
3.2.4.	Perfil de Presiones y Evaluación de diámetros.	115

3.2.4.1.	<i>Evaluación de caídas de presión en redes de tuberías que manejan fluidos compresibles.</i>	115
CAPITULO 4. ASPECTOS CONSIDERADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE TUBERÍA DEL SRP DE LA PLANTA HDS DE NAFTA.		117
4.1.	<i>Descripción del Proceso de la Planta HDS de Naftas.</i>	117
4.1.1.	Introducción.	117
4.1.2.	Sección de Reacción.	117
4.1.3.	Sección de Fraccionamiento.	121
4.1.4.	Sección de Regeneración de Amina.	125
4.2.	Puntos Críticos de la Planta HDS de Naftas.	135
4.3.	Diagramas de desfogue del SRP de la Planta HDS de Naftas.	140
4.4.	Obtención de datos de las válvulas que componen el SRP de la planta HDS de Naftas.	142
CAPITULO 5. DISEÑO DE LA FUNCIÓN OBJETIVO Y ANALISIS DEL MODELO MATEMATICO PARA LA OPTIMIZACIÓN.		145
5.1.	Formulación del Problema.	145
5.2.	Planteamiento del método de optimización de la red de tuberías del SRP utilizando algoritmos genéticos.	147
5.2.1.	Datos de entrada utilizados por el método de optimización con algoritmos genéticos.	147
5.2.2.	Implementación del Algoritmo.	149
5.2.2.1.	Codificación.	149
5.2.2.2.	Generación de la Población inicial.	150
5.2.2.3.	Evaluación de la aptitud.	150
5.2.2.4.	Operadores Genéticos.	150
5.2.2.5.	Generación de la Nueva Población.	150
5.2.2.6.	Condición de Terminación.	151
5.2.2.7.	Variables de salida	151
CAPITULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.		152
6.1.	Definición del problema.	152
6.2.	Análisis de fallas.	152
6.3.	Datos utilizados en la optimización.	155
6.4.	Resultados obtenidos.	159
CONCLUSIONES		168
BIBIOGRAFÍA		171
ANEXO A		A-1
ANEXO B		A-7

LISTA DE FIGURAS.

FIGURA	DESCRIPCIÓN	PAGINA
1.1.	Capas de Protección.	2
1.2.	Esquema general de un Sistema de Relevo de Presión.	3
1.3.	Partes constituyentes de un SRP.	4
1.4.	Representación de un Sistema de Relevo de Presión Abierto.	5
1.5.	Sistema de Relevo de Presión Cerrado.	6
1.6.	Válvula de Seguridad-Relevo Convencional.	10
1.7.	Válvula de Relevo de Presión Balanceada.	11
1.8.	Válvula de Relevo operada por piloto.	12
1.9.	Dispositivos de Disco de Ruptura.	12
1.10.	Factor de corrección por contrapresión, k_b , para PSV Balanceadas de fuelles (Vapor y Gases).	20
1.11.	Factor de corrección de capacidad, k_w , debido a la contrapresión, en PSV de fuelles balanceadas en servicio de líquido.	21
1.12.	Curva para evaluar el coeficiente C en la ecuación de flujo de la relación de calor específico considerando gas ideal.	21
1.13.	Valores de F_2 para flujo subcrítico.	23
1.14.	Factor de corrección de capacidad, k_v , debido a la Viscosidad.	26
1.15.	Factores de corrección de capacidad debido a la sobrepresión para PSV no certificadas en servicio de líquido.	26
2.1.	Restricciones de igualdad.	41
2.2.	Restricciones de desigualdad.	41
2.3.	Restricciones Discretas.	42
2.4.	Restricciones de Regiones separadas.	42
2.5.	Puntos óptimos de una función.	42
2.6.	a) Región factible para tres desigualdades. b) Región factible para tres desigualdades y una ecuación.	43 43
2.7.	a) Región Factible convexa. b) Región Factible no convexa.	44 44
2.8.	a) Función convexa. b) Función no convexa.	44 44
2.9.	a) Mínimo local fuerte. b) Mínimo local débil.	45 45
2.10.	Función con dos mínimos locales.	45
2.11.	Superficie $L(x, \lambda)$.	46
2.12.	Punto de Silla de Caballo.	47
2.13.	Representación geométrica de un punto que satisface las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker.	51
2.14.	Óptimo en el vértice x^* para el problema de PL.	53
2.15.	a) Redondeo infactible de la solución entera relajada. b) Redondeo no óptimo de solución entera relajada.	55 55

FIGURA	DESCRIPCIÓN	PAGINA
2.16.	Árbol de ramas y límites para el problema ejemplo (PLEM).	55
2.17.	Algoritmo Genético descrito como proceso continuo.	63
2.18.	Selección proporcional o por ruleta.	65
2.19.	Cruzamiento de un punto (1-point crossover).	66
2.20.A.	Orden y longitud de definición de un esquema.	67
2.20.B.	Tres tipos de cruzamiento.	73
3.1.	Forma de la función objetivo para una sección de tubería individual.	92
3.2.	Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo.	
3.3.	Pasos del algoritmo genético.	95
3.4.	Un punto de cruzamiento (ejemplo una cadena de cinco caracteres).	100 101
3.5.	Mutación (Ej. Cadena de cinco caracteres)	
3.6.	Metodología para el diseño del SRP.	101
3.7.	Metodología para el dimensionamiento del cabezal del SRP.	106
3.8.	Red de un Sistema de Relevo de Presión.	108 109
4.1.	Diagrama de Flujo de Proceso, Esquema típico (DFP-01), Planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización. Sección de Reacción, Tanques de carga-separadores caliente y frío de los productos.	127
4.2.	Diagrama de Flujo de Proceso, Esquema típico (DFP-02), Planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización. Sección de Reacción, Reactor de saturación de diolefinas-reactor de desulfuración-compresor de Hidrogeno de recirculación.	128
4.3.	Diagrama de Flujo de Proceso, Esquema típico (DFP-03), Planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización. Sección de Reacción, Compresor de Hidrogeno de reposición.	129
4.4.	Diagrama de Flujo de Proceso, Esquema típico (DFP-04), Planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización. Sección de Fraccionamiento, Torre desbutanizadora.	130
4.5.	Diagrama de Flujo de Proceso, Esquema típico (DFP-05), Planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización. Sección de Fraccionamiento, Torre separadora de Naftas.	131
4.6.	Diagrama de Flujo de Proceso, Esquema típico (DFP-06), Planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización. Sección de Regeneración de Amina, Torre regeneradora de Amina.	132
4.7.	Diagrama de Flujo de Proceso, Esquema típico (DFP-07), Planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización. Sección de Recuperación de Condensado.	133
4.8.	Diagrama de Flujo de Proceso, Esquema típico (DFP-08), Planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización. Sección de Recuperación de Aguas Amargas.	134

FIGURA	DESCRIPCIÓN	PAGINA
4.9.	Diagrama del sistema de separación de la planta HDS de Naftas.	135
4.10.	Diagrama del sistema de recirculación de la planta HDS de Naftas.	135
4.11.	Diagrama del sistema de reacción de planta HDS de Naftas.	136
4.12.	DRP de la sección de separación del proceso HDS de Naftas (separador caliente).	138
4.13.	DRP de la sección de separación del proceso HDS de Naftas (separador frío).	139
4.14.	Red de tubería de baja de presión del SRP de la planta HDS de Naftas.	140
4.15.	Red de tubería de alta de presión del SRP de la planta HDS de Naftas.	141
4.16.	Red de tubería de desfogue ácido (parte 1) del SRP de la planta HDS de Naftas.	141
4.17.	Red de tubería de desfogue ácido (parte 2) del SRP de la planta HDS de Naftas.	142
5.1.	Costo por unidad de longitud vs diámetros.	145
5.2.	Método para la optimización de la red de tubería del SRP usando algoritmos genéticos.	148
6.1.	Esquema de la configuración de la red de tuberías del cabezal de baja presión de la planta HDS de Naftas.	154
6.2.	Esquema de la configuración de la red de tuberías del cabezal de de desfogue ácido (parte 2) de la planta HDS de Naftas.	155
6.3.	Efecto del peso de la penalidad, r , sobre el costo de la red y la penalidad.	158
6.4.	Diámetros de la red de tuberías de desfogue de baja presión obtenidos por los programas: Algoritmo Genético y Desfogue.	166
6.5.	Porcentajes promedio de diferencias entre $\Delta P_{disponible}$ y $\Delta P_{sistema}$ para cada una de las fallas presentes en la red de tuberías de baja presión.	166
6.6.	Diámetros de la red de tuberías de desfogue ácido obtenidos por los programas: Algoritmo Genético y Desfogue.	167
6.7.	Porcentajes promedio de diferencias entre $\Delta P_{disponible}$ y $\Delta P_{sistema}$ para cada una de las fallas presentes en la red de tuberías de desfogue ácido.	167

LISTA DE TABLAS

TABLA	DESCRIPCIÓN	PAGINA
1.1.	Valores de Sobrepresión comúnmente usados.	18
1.2.	Orificios Nominales	27
1.3.	Analogía entre AGs y el sistema natural.	59
3.1.	Ejemplo de fallas en un Sistema de Relevos de Presión.	109
3.2.	Secuencia de cálculo.	111
4.1.	Datos de las válvulas que conforma el cabezal de baja presión de la Planta HDS de Naftas.	143
4.2.	Datos de las válvulas que conforma el cabezal de alta presión de la Planta HDS de Naftas.	143
4.3.	Datos de las válvulas que conforma el cabezal de desfogue ácido (parte 1) de la Planta HDS de Naftas.	144
4.4.	Datos de las válvulas que conforma el cabezal de desfogue ácido (parte2) de la Planta HDS de Naftas.	144
6.1.	Análisis de fallas para el cabezal de baja presión.	153
6.2.	Análisis de fallas para el cabezal de desfogue ácido.	153
6.3.	Parámetros utilizados por el algoritmo genético	155
6.4.	Configuración de la red de tuberías del desfogue ácido del SRP de la planta HDS de Naftas.	156
6.5.	Configuración de la red de tuberías del sistema de relevos de baja presión de la planta HDS de Naftas.	156
6.6.	Características particulares de las válvulas del desfogue de baja presión de la planta HDS de Naftas.	157
6.7.	Características particulares de las válvulas del desfogue ácido de la planta HDS de Naftas	157
6.8.	Diámetros generados por cada falla de la red de baja presión mediante el algoritmo genético.	160
6.9.	Costo final de la red de tuberías de baja presión obtenido mediante el algoritmo genético.	161
6.10.	Diámetros generados por cada falla de la red de desfogue ácido mediante el algoritmo genético.	161
6.11.	Costo final de la red de tubería de desfogue ácido obtenido mediante el algoritmo genético.	162
6.12.	Diámetros generados por cada falla de la red de baja presión mediante el programa Desfogue.	162
6.13.	Costo final de la red de tubería de baja presión mediante el programa desfogue.	163
6.14.	Diámetros generados por cada falla de la red de desfogue ácido mediante el programa Desfogue.	164
6.15.	Costo final de la red de tuberías de desfogue ácido obtenido mediante el programa Desfogue.	165

RESUMEN.

Los sistemas de relevo de presión son la parte más crítica en la seguridad de una planta siendo estos la última capa de protección de la de la misma, que puede consistir solamente de un disco de ruptura o válvula de seguridad - relevo, con o sin tubería de descarga, sobre un recipiente o en una línea, o bien sistemas más complejos que involucran diversos dispositivos de relevo de presión, arreglos en cabezales comunes y el envío a un equipo de disposición terminal.

El diseño de los sistemas de relevo de presión es una tarea bastante compleja y optimizar una red de fluidos compresibles que es el caso de la red de tubería que forma parte del sistema de relevo de presión lo es aún más. El problema del diseño óptimo de la red consiste en la selección del conjunto de diámetros de tubería correspondientes al mínimo costo de capital de acuerdo con los límites superiores en las caídas de presión debido a las especificaciones de diseño. El objetivo de este trabajo es presentar una alternativa de solución para el dimensionamiento óptimo de la red de tuberías mediante el uso de métodos sistemáticos para la resolución de problemas de búsqueda y optimización que aplican a éstos los mismos métodos de la evolución biológica: selección con base en la población, reproducción sexual y mutación, denominados Algoritmos Genéticos.

El Algoritmo Genético desarrollado es implementado en un programa de computo codificado en lenguaje Fortran 90 para llevar a cabo la optimización de las redes de tubería que forman parte del sistema de relevo de presión de la planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización perteneciente a la Refinería de Minatitlán, Veracruz, considerándose régimen permanente e isotérmico, y los flujos en cada tramo de tubería son conocidos, así como sus propiedades físicas. Además se realiza la comparación de los resultados con un programa utilizado para realizar el diseño de cabezales de relevo de presión (que utiliza las mismas consideraciones), donde existe una mejoría en el aprovechamiento de la caída de presión disponible en los sistemas al usar el Algoritmo Genético lo que implica que los costos se reducen y por tanto se lleva a cabo la optimización de las redes de los diferentes cabezales analizados cumpliendo con los objetivos plantados.

INTRODUCCIÓN.

La seguridad en una planta de proceso petroquímica o de refinación es un factor primordial, y se debe considerar desde la fase de ingeniería de diseño hasta la operación y puesta en marcha de la misma; sin embargo existen casos en los cuales hay riesgos implícitos debido al proceso o a una falla inadvertida, consecuencia de la operación misma de la planta; uno de los mayores riesgos que se generan es debido al incremento excesivo de presión en los equipos o sistemas que pueden ocasionar la fractura o daño de los mismos. Este incremento súbito de presión se puede generar por distintas causas y existen algunos medios y dispositivos para mitigarlo; por ejemplo, por medio de un control de presión o un venteo manual, sin embargo el más efectivo y confiable es el Sistema de Relevo de Presión (SRP).

La protección efectuada por el SRP a equipos y tuberías consiste en colocar dispositivos de relevo de presión los cuales actúan debido a la presión estática y están diseñados para abrir durante una emergencia o condiciones anormales y con ello prevenir el incremento en la presión con respecto a un valor previamente especificado.

La parte umbral del diseño del SRP consiste en determinar los diámetros requeridos para la red de tuberías y que integran la topología global del sistema, los cuales cumplan con las restricciones inherentes a la caída de presión disponible en el sistema, ubicación de Dispositivos de Relevo de Presión (DRP) y simultaneidad de fallas; dicha evaluación de diámetros, requiere establecer el Balance de Materia y el perfil de presiones a través de la red, el cual es función directa del perfil de temperaturas y la variación de propiedades termodinámicas a lo largo del sistema; en consecuencia el problema es multivariable y complejo, el cual requiere en sí mismo de un algoritmo de cálculo con iteraciones múltiples hasta encontrar la solución deseada.

Como referencia para el diseño de éstos; existen diversos métodos que consideran los casos extremos de fluidos compresibles (isotérmico y adiabático) y que han sido ampliamente estudiados, la mayoría de los cuales están establecidos o indicados como referencia en estándares internacionales como el ASME Sección VIII División I; y en prácticas recomendadas como el API RP 520⁽³⁾, API RP 521⁽⁴⁾, lo cual permite con base en aceptables juicios de ingeniería asegurar que el diseño de este tipo de sistemas sea conservador y en consecuencia lo más seguro posible. Con base en lo anterior el presente trabajo considera únicamente fluidos compresibles, evaluados a temperatura constante en tramos pequeños y a régimen permanente y sin reacción química.

El diseño del SRP de una planta de proceso, es en sí mismo complejo y en consecuencia requiere un gran consumo de horas-hombre de personal

especializado en su desarrollo; consecuencia de ello, en la fase de ingeniería conceptual o básica existe la tendencia de emplear métodos cortos para el diseño lo cual ocasiona en la gran mayoría de casos, un sobrediseño e incremento excesivo en la estimación de los gastos inherentes a la construcción, consecuencia de ello, es bastante recomendable observar mayor cuidado en el diseño de estos sistemas, ya que su costo representa del 30 al 50% del costo total de la planta. Este aspecto es importante ya que actualmente las plantas industriales buscan reducir sus costos al máximo e incrementar sus beneficios, conservando la seguridad del proceso con base en leyes y códigos vigentes; esto es inherentemente la optimización del proceso y de sus sistemas de seguridad.

Una de las formas para alcanzar los objetivos antes mencionados es precisamente mediante la optimización de la red de fluidos compresibles que conforman el diseño de sistema de relevo de presión. Para tal fin, existen una gran variedad de métodos los cuales tienen origen matemático de tipo discreto o continuo y que se fundamentan principalmente en la maximización o minimización de una función objetivo la cual se estructura de acuerdo a los parámetros que físicamente constituyen las restricciones propias del sistema, por ejemplo minimizar el costo, maximizar la producción, etc.

En el presente trabajo, se desarrolla el estudio para mejorar el diseño de uno de los componentes del SRP, tal es el caso de la red de tuberías compuesta por el cabezal principal y ramales adyacentes a él, utilizando métodos sistemáticos para la resolución de problemas de búsqueda y optimización que aplican a éstos los mismos métodos de la evolución biológica, selección con base en la población, reproducción sexual y mutación, denominados Algoritmos Genéticos (AG), los cuales, después de parametrizar el problema en una serie de variables (x_1, \dots, x_n) se codifican en un cromosoma y todos los operadores utilizados por el AG se aplican sobre este cromosoma o sobre poblaciones de ellos. En el algoritmo genético va implícito el método para resolver el problema; son sólo parámetros de tal método los que están codificados. La gran ventaja de los AG es que es independiente del problema, lo cual lo hace un algoritmo con gran aplicabilidad para cualquier problema de optimización. Las soluciones codificadas en un cromosoma compiten para ver cuál constituye la mejor solución (aunque no necesariamente la mejor de todas las soluciones posibles). El *ambiente*, constituido por las otras soluciones, ejercerá una presión selectiva sobre la población, de forma que sólo los mejor adaptados (aquellos que resuelvan mejor el problema) sobrevivan o trasmitan su material genético a las siguientes generaciones, igual que en la evolución de las especies. La diversidad genética se introduce mediante mutaciones y reproducción sexual. En la Naturaleza lo único que hay que optimizar es la supervivencia, y eso significa a su vez maximizar diversos factores y minimizar otros. Los AG han generado gran interés debido a que se trata de una técnica

robusta (es decir posee) que pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas, incluyendo aquellos problemas en que otros métodos encuentran dificultad. El gran campo de los algoritmos genéticos se relaciona con aquellos problemas para los cuales no existen técnicas especializadas; debido a su naturaleza evolutiva los Algoritmos genéticos realizan búsquedas en espacios complejos mediante el mantenimiento de una población de soluciones potenciales.

El desarrollo del presente trabajo establece una metodología de solución para optimizar SRP considerando fluidos compresibles a régimen permanente empleando AG y lo aterriza finalmente en un caso de estudio concreto para una planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización, la cual será construida en la Refinería "Lázaro Cárdenas del Río" en la ciudad de Minatitlán, Veracruz.

El presente trabajo esta estructurado en 6 capítulos, a continuación se describe en forma general el contenido de cada uno de ellos.

El Capitulo 1, "Generalidades del Sistema de Relevo de Presión", tiene como objetivo principal, presentar los antecedentes y generalidades técnicas referentes a los SRP, en él se muestran los conceptos, terminología, clasificación y las principales causas que pueden ocasionar sobrepresión en los equipos de proceso de la planta. Así mismo se indican las características y funcionamiento de los dispositivos de relevo de presión y como se lleva a cabo su diseño, finalmente se hace mención de los criterios de diseño para el dimensionamiento del cabezal del sistema de relevo de presión, haciendo especial énfasis en el modelo matemático y métodos para el cálculo de la caída de presión.

El Capitulo 2, "Aspectos Teóricos de la Optimización", muestra brevemente los conceptos básicos de optimización, condiciones de optimalidad así como una vista general de las diferentes metodologías y técnicas disponibles en dicha área. Esto con la intención de presentar un panorama de las alternativas generales y la ubicación como método adaptativo e ingenioso de los algoritmos genéticos. Finalmente se presentan de manera específica al Algoritmo Genético Simple, fundamentos matemáticos y las variaciones en el AGS que pueden complementar o remplazar las partes de su estructura. Este capítulo tiene como propósito dar a conocer los fundamentos desde un punto de vista global, de los algoritmos genéticos debido a que es el método que se utiliza para realizar la optimización de la red de tuberías del SRP de la planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización.

En el Capitulo 3, "Estructura y Algoritmo Para la Evolución y Diseño de SRP considerando Régimen Permanente e Isotérmico", se presentan algunos trabajos referentes, realizados en la optimización del diseño del cabezal del

SRP y se plantea el algoritmo de cálculo utilizado para el dimensionamiento del cabezal del SRP, el cual es implementado como parte de la optimización de la red de tuberías del SRP de la planta HDS de Naftas.

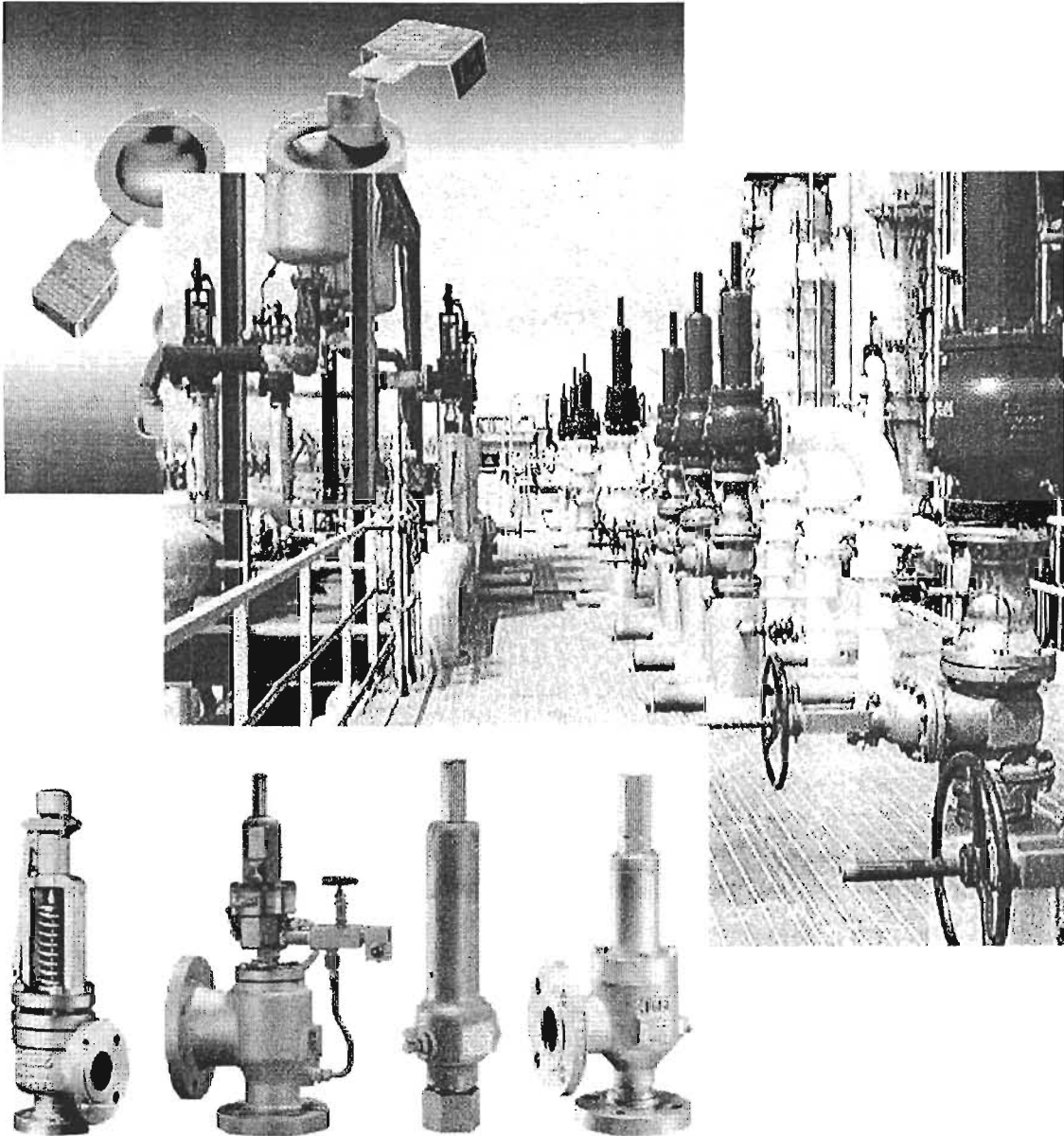
El Capitulo 4, "Aspectos Considerados para la Optimización de la Red de tuberías del SRP de la Planta HDS de Naftas", comprende la descripción del proceso de la Planta HDS de Naftas que nos permite entender en forma global el proceso, así como esquemas de los diferentes cabezales del SRP que lo conforman, y también se incluyen los datos de las válvulas de relevo de presión que los componen.

En el Capitulo 5, "Diseño de la función objetivo y Análisis de modelo matemático para la optimización de la red de tuberías del SRP", se presenta la formulación de la función objetivo así como las restricciones y consideraciones que se realizaron para poder desarrollarla; así como el algoritmo global de solución y el desarrollo de modelo de optimización que utiliza un algoritmo genético el cual es implementado en programa de computadora en Fortran 90 presentándose las partes que lo constituyen.

Finalmente el Capitulo 6, "Análisis de Resultados"; muestra los resultados obtenidos mediante la optimización de la red de tubería del cabezal de baja presión del SRP de la planta HDS de Naftas de Minatitlán utilizando el Algoritmo Genético Simple; y una comparación entre un sistema optimizado y uno desarrollado sin optimizar en la fase de ingeniería conceptual.

Finalmente en el Anexo A se presentan las tablas de resultados de una forma mas detallada y en el Anexo B se muestra la codificación del algoritmo genético en Fortran 90 usado en la optimización de la red de tubería del SRP.

CAPITULO 1. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE RELEVO DE PRESIÓN.



CAPITULO 1. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE RELEVO DE PRESION.

Los sistemas de relevo de presión son la parte más crítica en la seguridad de una planta siendo éstos la última capa de protección de la misma, su objetivo es prevenir que se acumulen presiones excesivas en los equipos debido a problemas operativos o situaciones de emergencia. El sistema de relevo consiste en una tubería principal (cabezal principal) y de las tuberías de descarga de las válvulas de seguridad (ramales) las cuales se conectan al cabezal principal. En el presente capítulo se muestra un esquema general de lo que son los sistemas de relevo de presión (SRP), su funcionamiento y de los elementos que lo constituyen así como criterios de diseño para el dimensionamiento del cabezal.

1.1. Aspectos teóricos del Sistema de Relevo de Presión.

1.1.1. Definición de un Sistema de Relevo de Presión (SRP).

Se llama SRP al sistema formado por dispositivos y tuberías, que permiten eliminar o disminuir un exceso de presión en un equipo, por medio del desplazamiento de una determinada masa de fluido desde el equipo sobrepresionado hacia un lugar en el que se puede disponer de ella con mayor seguridad.

Con base en la definición del American Petroleum Institute (API) Recommended Practice 521 "Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems"⁽⁵⁾, un SRP es un arreglo de accesorios de relevo de presión, tubería y un medio de disposición proyectado para el relevo seguro, el transporte y la disposición de los fluidos en fase líquida, vapor o gaseosa.

Un SRP puede consistir solamente de un disco de ruptura o válvula de seguridad relevo, con o sin tubería de descarga, sobre un recipiente o en una línea. Un sistema más complejo puede involucrar varios Dispositivos de Relevo de Presión, arreglos en cabezales comunes y el envío a un equipo de disposición terminal.

1.1.1.1. Capas de protección ^(38, 45).

Las capas de protección principales en una planta son los sistemas de seguridad, los cuales son dispositivos diseñados para realizar funciones de protección, mitigación, reducción de riesgo y disminución de la posibilidad de que una condición insegura se presente en un proceso industrial (figura 1.1).

Las capas de protección se describen a continuación:

- a) *Sistemas básicos de control (SCD)*. Se utilizan para monitorear y controlar los procesos en las plantas. El desempeño de estos sistemas se reflejan en la calidad del producto y en la eficiencia de la planta. En un momento dado, si el control se pierde, el proceso puede llegar a convertirse en peligroso para el personal y la comunidad además el medio ambiente también puede verse afectado.
- b) *Sistemas de seguridad (ESD)*. Cuando el control del proceso se convierte en peligroso, en ese momento debe actuar el sistema de protección de seguridad (Ej. Paro de emergencia).
- c) *Sistema de Gas y Fuego (F & G)*. Cuando se detecta un conato de fuego, el sistema deberá de mitigar el fuego y también mandar su señal al sistema de seguridad para que este corte o bloqueé el punto en donde existe la fuga que esta ocasionando el fuego.
- d) *Sistema de Relievo de Presión (SRP)*. El SRP es la última capa de protección, su objetivo es la protección de equipo y consecuentemente la protección del personal previniendo así una sobrepresurización cuando ocurre una falla en el sistema.

La razón principal de la existencia de los sistemas de seguridad es el "Riesgo implícito", todos los procesos tienen un nivel de riesgo, ya sea por su diseño, por los materiales que se manejan, por las reacciones que se generan en él, por la posibilidad de fugas de materiales peligrosos, por la operación y por otros muchos factores desde técnicos, culturales, económicos y legales.

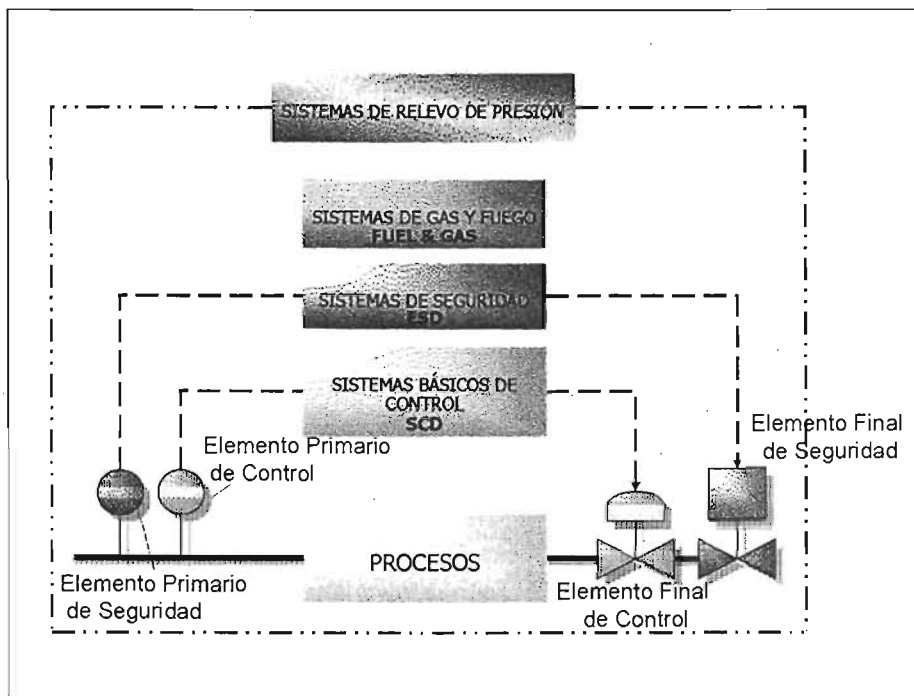


Figura 1.1. Capas de protección.

1.1.1.2. Partes constituyentes de un SRP.

Los Sistemas de Relievo incluyen en general válvulas de seguridad, tubería (cabezal), tanque(s) de separación y quemador, los que deben ser dimensionados adecuadamente basándose en las condiciones específicas de las características de operación y seguridad de cada planta considerada.

En la figura 1.2 se muestra un Sistema de Relievo de Presión.

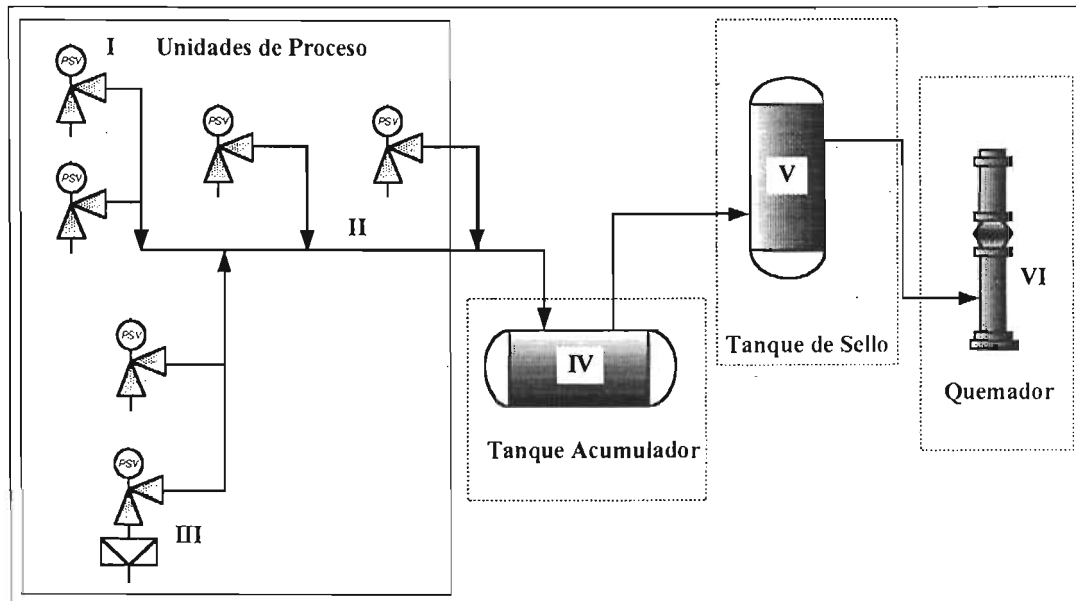


Figura 1.2. Esquema general de un Sistema de Relievo de Presión.

Donde la serie de dispositivos de que consta normalmente es (I) una válvula ajustada para abrir a una cierta presión que es igual o menor que la presión de diseño del equipo, permitiendo el flujo en una sola dirección, pues al disminuir la presión en el equipo, esta vuelve a cerrar. La válvula normalmente conectada a una red de tubería (II) o cabezal al que pueden unirse las descargas de varios sistemas con sus respectivas válvulas de relieves. El disco de ruptura (III) es otro dispositivo del SRP y consiste en un disco metálico diafragmado en el que el grosor de la película metálica está calculado para fragmentarse a una cierta presión y que generalmente se usa en combinación con una válvula de relieves. Después se tiene el tanque separador de líquido (Knock Out Drum), cuya función es separar el líquido que arrastre el gas en el SRP. El tanque de sello (V) se utiliza para condensar restos de humedad que se encuentre en la corriente gaseosa, pero su principal función es la de mantener una presión mínima al quemador y evitar el regreso de la flama del quemador o que entre aire si la flama del quemador se apaga. En el quemador (VI) es donde se quema el gas; esto se hace generalmente si el fluido es tóxico y es necesario quemarlo antes de ser enviado a la atmósfera⁽⁵⁾.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente las partes constituyentes de un SRP se pueden ver de forma esquemática en la figura 1.3.

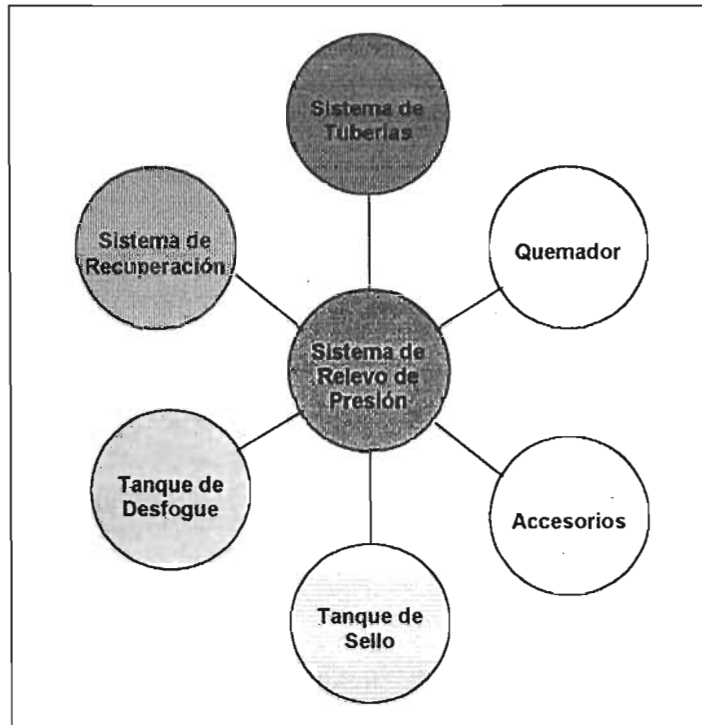


Figura 1.3. Partes constituyentes de un SRP.

1.1.1.3. Requerimientos de un Sistema de Relievo de Presión.

Los requerimientos que debe satisfacer un SRP para su instalación son esencialmente los siguientes:

- 1) Proteger al personal de operación contra los daños que pudiera causar la sobrepresión del equipo de proceso.
- 2) Disminuir las pérdidas de material valioso durante y después de una falla operacional que haya causado exceso de presión en un equipo por un corto periodo.
- 3) Disminuir las pérdidas de tiempo ocasionadas por la sobrepresión en los equipos.
- 4) Prevenir el daño al equipo.
- 5) Prevenir el daño a propiedad civil y adjunta a la planta de operación.

- 6) En caso de haberlas, reducir la prima de seguros.
- 7) Cumplir con la normatividad vigente⁽⁵¹⁾.
- 8) Debe ser económicamente factible.

1.1.1.4. Tipos de Sistemas de Relievo de Presión.

Básicamente existen tres tipos de SRP que son utilizados en las plantas de procesos, y se clasifican de acuerdo a la forma en que disponen la masa relevada.

1.1.1.4.1. Sistema de Relievo de Presión Abierto.

Se llama así al sistema en el cual la masa relevada entra en contacto directo con la atmósfera al ocurrir el desfogue, por lo tanto, para permitir que la sustancia relevada salga a la atmósfera directamente esta no debe reaccionar químicamente con el aire, tampoco deben formar mezclas explosivas o inflamables con él (figura 1.4). Considerándose como sustancias permitidas para relevar a la atmósfera el agua, aire comprimido y vapor de agua que únicamente deben satisfacer lo referente a ruido excesivo durante la descarga.

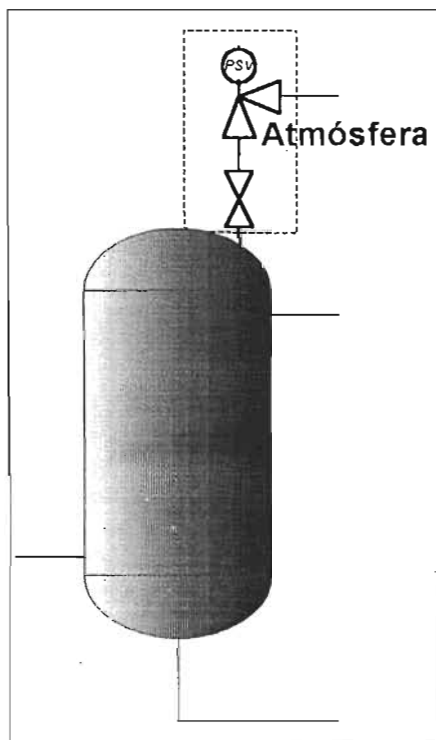


Figura 1.4. Representación de un Sistema de Relievo de Presión Abierto.

1.1.1.4.2. Sistema de Relevo de Presión Cerrado.

Este sistema se utiliza cuando el fluido a relevar no debe entrar en contacto con la atmósfera debido a su naturaleza, por ello se debe enviar a un sistema cerrado.

El sistema cerrado consiste en un cabezal y ramales en los cuales se integra la descarga de los distintos dispositivos de relevo de presión y conduce el flujo relevado hacia el lugar donde se dispondrá adecuadamente de él, esto de acuerdo a su estado físico, sin embargo el relevo de incondensables al quemador es el más común y presenta alternativas: el quemador elevado o el quemador tipo fosa (figura 1.5). Esta ultima decisión depende del espacio disponible, de las condiciones locales y del análisis económico de cada caso; además se debe proveer un tanque separador antes del quemador para impedir que pase líquido que pudiera haber sido arrastrado; por lo tanto el sistema cerrado a quemador tiene la ventaja de ser el mas seguro pero debido a la tubería y arreglo necesario así como el costo del quemador, no puede resultar en general mas económico.

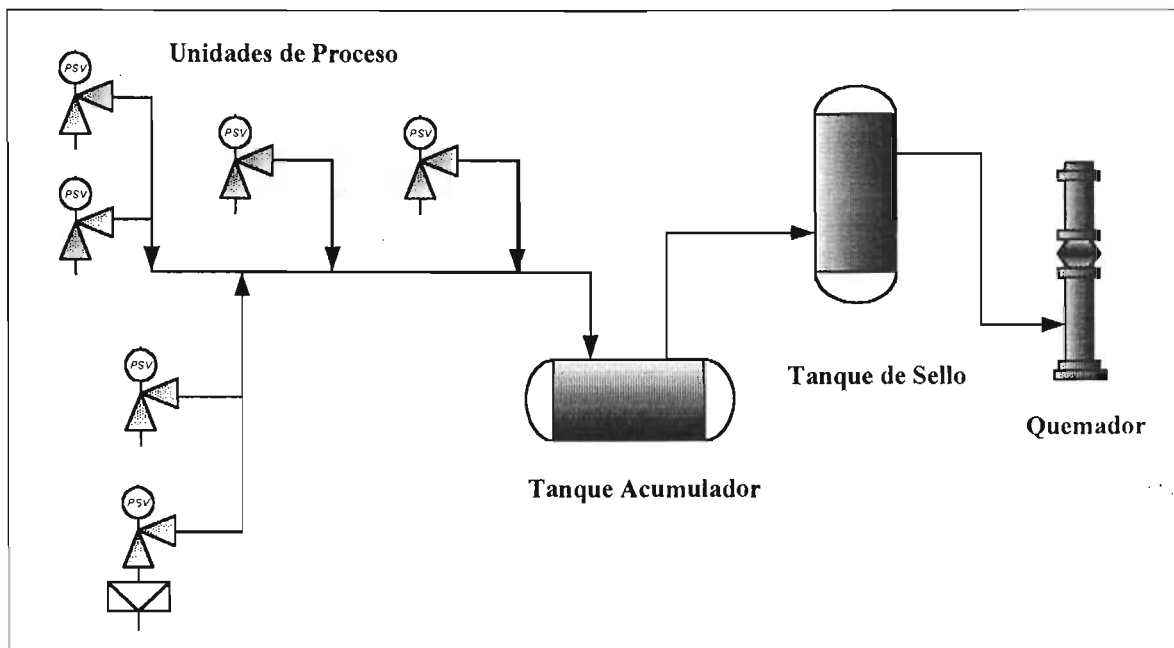


Figura 1.5. Sistema de Relevo de Presión Cerrado.

1.1.1.4.3. Sistema de Relevo de Presión con Recuperación.

Cuando el fluido a relevar es de alto valor o bien su combustión puede generar riesgos mayores, puede ser conducido a un SRP con recuperación.

El sistema de recuperación es un sistema cerrado que en conjunto ofrece la posibilidad de recuperar el producto, o bien su neutralización o conversión hacia productos menos riesgosos. Estos últimos ya pueden ser enviados a quemador o bien liberados a la atmósfera dependiendo su peligrosidad.

Generalmente los desfogues en fase vapor tienen como destino el sistema cerrado, y los desfogues en fase líquida se dirigen hacia el sistema de recuperación.

1.1.1.5. Terminología y conceptos.

1.1.1.5.1. Presión de Ajuste.

Es la presión manométrica de entrada a la cual la válvula de seguridad se ajusta para abrir bajo condiciones de servicio.

1.1.1.5.2. Presión de Diseño.

Es la condición más severa de presión y temperatura coincidentes en la operación. Se puede emplear en lugar de la *máxima presión de trabajo permisible (MPTP)* en todos los casos en donde esta no se ha determinado. La presión de diseño es la presión usada en el diseño de un recipiente para determinar el mínimo espesor permisible u otras características físicas de los diferentes partes del recipiente.

1.1.1.5.3. Sobrepresión.

Es el incremento de presión de ajuste del *dispositivo de relevo de presión (DRP)*, expresado en unidades de presión o como porcentaje. Es lo mismo que la acumulación cuando el DRP esta ajustado a la MPTP del recipiente, asumiendo que no hay pérdidas por fricción en la entrada del DRP.

1.1.1.5.4. Acumulación.

Incremento de presión de un recipiente sobre la MPTP (*MAWP Maximum Allowable Working Pressure*) durante la descarga a través de un DRP (*Pressure Relief Device*) expresado en unidades de presión o como porcentaje. La máxima acumulación permisible es establecida por códigos aplicables para contingencias por operación o por fuego.

1.1.1.5.5. Contrapresión.

Es la presión que existe a la salida de un DRP como resultado de la presión en el sistema de descarga. La contrapresión puede ser constante o variable. La contrapresión es la suma de la presión superimpuesta (*superimposed pressure*) y desarrollada (*build-up back pressure*).

1.1.1.5.6. Contrapresión Desarrollada (Built-up back pressure).

Es el incremento de la presión en el cabezal de descarga que se desarrolla como resultado del flujo después de que el DRP abre.

1.1.1.5.7. Contrapresión Superimpuesta.

Es la presión estática que existe a la salida de un DRP al momento que se requiere que éste opere. Es el resultado de la presión de otras fuentes en el sistema de descarga y puede ser constante o variable. Es constante si la descarga de la válvula esta conectada a un recipiente de proceso o un sistema en el cual está operando con presión constante. Sin embargo casi siempre es variable como resultado de las condiciones cambiantes en el sistema de descarga.

1.1.1.5.8. Máxima Presión de Trabajo Permisible.

Es la máxima presión manométrica permisible de un recipiente terminado en su posición de operación para una temperatura designada. La presión se basa en cálculos para cada elemento en recipiente usando espesor nominal.

1.1.1.5.9. Condiciones de Relevo.

Se emplean para determinar la presión y temperatura de entrada de un DRP a la sobrepresión especificada. La presión de relevo de la válvula es igual a la presión de ajuste (o presión de apertura de un disco de ruptura) más la sobrepresión. La temperatura del fluido fluyendo a las condiciones de relevo puede ser más alta o más baja que la temperatura de operación.

1.1.1.5.10. Válvula de Relevo de Presión Balanceada.

Es la válvula de relevo de presión que incorpora los medios necesarios para minimizar los efectos de la contrapresión sobre las características de operación (Presión de apertura, presión de cierre y la capacidad de relevo).

1.1.1.5.11. Válvula de Relevo de Presión Convencional.

Es una válvula de relevo de presión que se ve afectada en su desempeño por cambios en la contrapresión.

1.1.2. Dispositivos de Relevo de Presión (DRP).

Los dispositivos de relevo de presión son aquellos destinados a proteger al equipo y al personal de la industria química, abriendo automáticamente a una presión predeterminada y evitar las consecuencias destructivas de la presión

en exceso, en los sistemas de proceso y recipientes de almacenamiento, los tipos básicos incluyen las válvulas de relevo de presión reguladas con resorte, válvulas operadas por piloto, discos de ruptura, dispositivos con carga de peso, dispositivos con cargas de presión y válvulas con venteo de presión y vacío.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-093-SCFI-1994⁽⁵¹⁾, un dispositivo de relevo de presión está diseñado para prevenir el incremento de la presión interna de un recipiente más allá de un valor predeterminado. También están diseñados para prevenir excesiva presión de vacío interno. Estos dispositivos pueden ser: una válvula de relevo, un dispositivo carente de la posibilidad de recierre (discos de ruptura), o una válvula de vacío (venteo).

1.1.2.1. Tipos de Dispositivos de Relevo de Presión.

A continuación se presentan la definición de los diferentes tipos de DRP, para poder entender el funcionamiento y aplicación de los mismos.

1.1.2.1.1. Válvula de Relevo.

Es un dispositivo de presión ajustado con resorte, accionado por la presión estática corriente arriba de la válvula. La válvula abre normalmente en proporción al incremento de la presión sobre la presión de apertura (de ajuste); normalmente se utiliza con fluidos incompresibles.

1.1.2.1.2. Válvula de Seguridad.

Es un dispositivo de relevo de presión ajustado con resorte, accionado por la presión estática corriente arriba de la válvula y se caracteriza por la rápida apertura o acción "pop"; normalmente se utiliza con fluidos compresibles.

1.1.2.1.3. Válvula de Seguridad-Relevo.

Es un dispositivo de relevo de presión ajustado con resorte que puede ser empleada como válvula de seguridad o como válvula de relevo, dependiendo de la aplicación.

1.1.2.1.4. Válvula de Relevo de Presión Convencional.

Es un dispositivo de relevo de presión ajustado con resorte que debido a sus características se ven afectadas directamente por los cambios en la contrapresión sobre la válvula (figura 1.6).

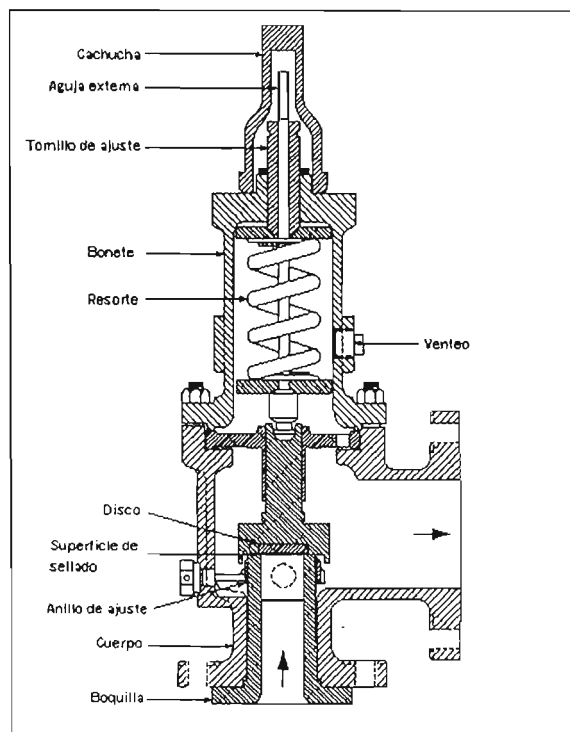


Figura 1.6. Válvula de Seguridad- Relevo Convencional.

Efectos de la Contrapresión en PSV convencionales en el cabezal del SRP.

1. Efectos debidos a la contrapresión de un DRP incluyen variaciones en la presión de apertura, reducción de la capacidad de flujo, inestabilidad o una combinación de todas ellas.
2. En PSV convencionales la contrapresión no debe exceder el 10% de la presión de ajuste al 10% de la sobrepresión permisible. Sección 3.3.3.1.3 API-520, Part I ⁽³⁾.

1.1.2.1.5. Válvula de Relevo de Presión Balanceada.

Es un dispositivo de relevo de presión ajustado con resorte que incorpora un medio para minimizar, los efectos de la contrapresión sobre las características propias de la válvula (figura 1.7).

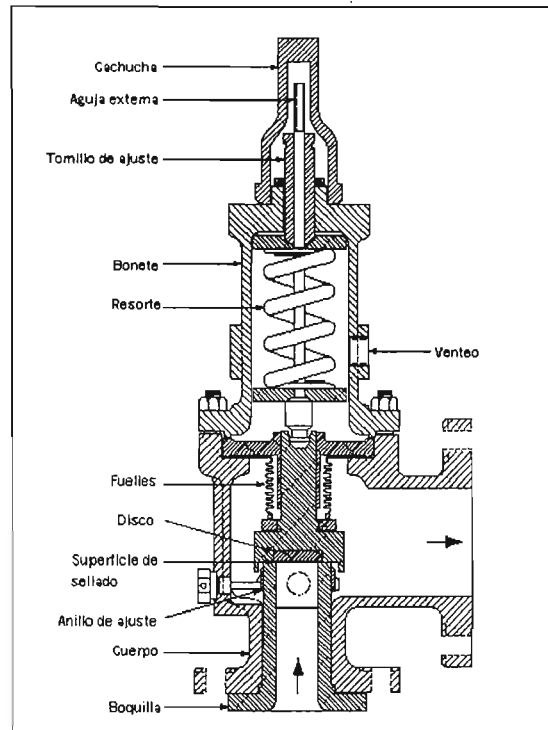


Figura 1.7. Válvula de Relevo de Presión Balanceada.

Efectos de la Contrapresión en PSV balanceadas en el cabezal del SRP.

1. Los efectos debidos a la contrapresión en DPR incluyen variaciones en la presión de apertura, reducción en la capacidad de flujo, inestabilidad o una combinación de todas ellas.
2. En PSV balanceadas la contrapresión no debe exceder el 30-50% de la presión de ajuste al 10% de la sobrepresión permisible. Sección 3.3.3.1.3 API-520, Part I ⁽³⁾.

1.1.2.1.6. Válvula de Relevo de Presión Operada por Piloto.

Es una válvula de relevo de presión en la cual la válvula principal se combina y se controla por una válvula de relevo de presión auxiliar (figura 1.8).

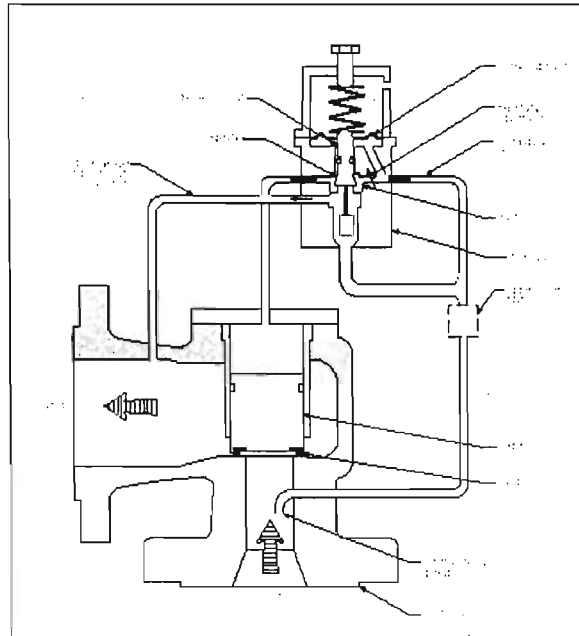


Figura 1.8. Válvula de Relevo Operada por Piloto.

1.1.2.1.7. Disco de Ruptura.

Es un accesorio de relevo de presión diferencial de no recierre accionado por la presión estática y diseñado para funcionar por la explosión debido a la presión contenida del disco de ruptura (figura 1.9);



Figura 1.9. Dispositivos de Discos de Ruptura.

1.1.2.2. Causas de Relevo de Presión.

La sobrepresión es el resultado de un desbalance o interrupción del flujo normal de materia y/o energía que ocasiona el incremento de presión en alguna parte del sistema; el análisis de las causas y magnitudes de

sobrepresión, es por tanto un estudio especial y complejo de balances de materia y energía en el sistema del proceso.

Las causas que generan sobrepresión, incluyendo fuego, se consideran que no se relacionan entre sí cuando no existe conexión mecánica, eléctrica o de proceso entre ellas. Los accesorios contra falla, equipo de arranque automático y otro tipo de instrumentación convencional no debe reemplazar a los accesorios de relevo de presión para equipos individuales; sin embargo, en el diseño de algunos componentes del sistema de relevo, tal como un cabezal, quemador y flama del quemador, se puede asumir la respuesta favorable en cierto porcentaje de los sistemas de instrumentos. Tal porcentaje de respuesta favorable es función de la cantidad de redundancia, esquemas de mantenimiento y otros factores que afectan la confiabilidad del instrumento.

Los recipientes a presión, intercambiadores de calor, equipo operando y tubería se diseñan para contener la presión del sistema, el diseño se basa en la presión de operación normal a temperatura de operación, el efecto de alguna combinación de cargas mecánicas que comúnmente ocurren y la diferencia entre la presión de ajuste del dispositivo de relevo de presión y la de presión. El diseñador del sistema de proceso debe definir la mínima cantidad de relevo requerida para prevenir el exceso de presión. Los riesgos potenciales de sobrepresión conforme al *API RP-521*⁽⁵⁾ se enlistan a continuación:

- 1) *Descarga bloqueada en recipientes.* El cerrar inadvertidamente una válvula de bloqueo de un recipiente a presión puede exponerlo a que exceda la máxima presión de trabajo permisible. Si al cerrar una válvula de bloqueo a la salida del recipiente se provoca sobrepresión, se debe colocar un accesorio de relevo de presión; excepto en donde existan procedimientos administrativos para cerrar la válvula de control, tales como candados o sellos. Cada válvula de control se debe considerar expuesta a una operación inadvertida.
- 2) *Apertura inadvertida de válvulas.* La apertura inadvertida de alguna válvula desde una fuente de alta presión, tal como vapor de alta presión o fluidos de proceso, se deben considerar.
- 3) *Falla de válvula check.* Cuando un fluido se bombea en un sistema de proceso que contenga gas o vapor a presiones significativamente mayores que la del diseño del equipo corriente arriba de la bomba, la interrupción del flujo acompañada por la falla de la válvula check en la línea de descarga de la bomba provocará flujo inverso del líquido. Cuando el líquido se ha desplazado en la succión del sistema, de alta presión del fluido puede crear serios problemas de sobrepresión.
- 4) *Falla de servicios.* Las consecuencias que se pueden desarrollar debido a la pérdida de servicios auxiliares, para la planta entera o una sección de ella

se deben evaluar cuidadosamente, dichos servicios son: electricidad, agua de enfriamiento, aire de instrumentos, vapor, combustible y gas inerte.

- 5) *Falla parcial.* Una evaluación del efecto de la sobrepresión que es atribuible a las pérdidas de algún servicio en particular debe incluir la cadena de acontecimientos que pueden ocurrir en el tiempo involucrado. En situaciones en las cuales el equipo falla, pero opera en paralelo con equipo auxiliar que tiene una diferente fuente de energía, se puede considerar que el equipo sigue operando normalmente.
- 6) *Falla mecánica o eléctrica.* La falla del equipo mecánico o eléctrico que proporcione enfriamiento o condensación en las corrientes de proceso pueden ocasionar sobrepresión en recipientes de proceso.
- 7) *Pérdidas de ventiladores.* Los ventiladores sobre intercambiadores de calor con aire o torres de enfriamiento ocasionalmente llegan a fallar debido a pérdidas en la energía o ruptura mecánica.
- 8) *Pérdidas de calor en series de sistemas de fraccionamiento.* En series de fraccionamiento, esto es, donde los fondos de la primera columna alimentan a la segunda y está a la tercera, etc., las pérdidas de entrada de calor pueden provocar sobrepresión en la siguiente columna. El resultado de las pérdidas de calor provoca que algunos de los componentes ligeros se mezclen con los fondos y sean transportados a la siguiente columna como alimentación; bajo tales circunstancias, la carga de los domos de la segunda columna como puede consistir de su vapor normal más los componentes ligeros de la primera columna, si la segunda columna no tiene la capacidad suficiente de condensación, se puede generar un exceso de presión en el sistema.
- 9) *Falla del aire de instrumentos o energía eléctrica.* La complejidad de la automatización de unidades de proceso, requiere el suministro de fuentes continuas y fiables de aire o corriente eléctrica, o ambos. La clave electrónica o instrumentos eléctricos se deben interconectar a una fuente eléctrica de emergencia. La condición de falla-segura de cada válvula de control se debe evaluar debido a las pérdidas de energía eléctrica o aire de instrumentos. Falla-segura se refiere a la acción de la válvula de control (abierta o cerrada con resorte, posición fija).
- 10) *Falla de reflujo.* Las pérdidas de reflujo como resultado de la falla de una bomba o algún instrumento puede ocasionar sobrepresión en la columna debido al inundamiento del condensador o pérdidas de enfriamiento en el proceso de fraccionamiento.
- 11) *Entrada de calor anormal desde rehervidores.* Los rehervidores se diseñan para una entrada de calor específica; cuando éstos son nuevos o

recientemente se han limpiado; se puede generar una entrada de calor adicional al proceso. En el evento de una falla de control de temperatura, la generación de vapor puede exceder la posibilidad de condensar del sistema o para absorber el incremento de presión.

- 12) *Falla de tubos de intercambiadores de calor.* En intercambiadores de tubos y coraza, los tubos están expuestos a fallas por numerosas causas, incluyendo choques térmicos, vibración y corrosión; cualquiera que sea la causa, el resultado es la posibilidad de que la corriente de alta presión sobrepresione al equipo sobre el lado de baja presión del intercambiador; se debe determinar la capacidad del sistema de baja presión para absorber el incremento de presión.
- 13) *Fuente de presión a régimen transitorio. Golpe de ariete de agua.* La probabilidad de ondas de choque hidráulico, ocurre cuando se llena algún sistema con líquido, el golpe de ariete con líquidos es un tipo de sobrepresión que no se puede controlar razonablemente por válvulas de seguridad, debido al tiempo de respuesta de las válvulas que normalmente son demasiado lentas. Las presiones de oscilación pico medidas en milisegundos pueden ser muchas veces más altas que la presión normal de operación. Estas ondas de presión dañan a los recipientes a presión y tubería. El golpe de ariete frecuentemente es causado por la acción de rápido cierre de las válvulas; en donde exista probabilidad de ocurrencia se puede emplear un amortiguador de pulsaciones.
- 14) *Golpe de ariete con vapor.* Una fuente de presión pico oscilante, puede ocurrir en tuberías que contienen fluidos compresibles; la ocurrencia más común generalmente se inicia por el rápido cierre de las válvulas. Esta fuente de presión oscilatoria ocurre en milisegundos, con un posible incremento de varias veces la presión normal de operación, provocando una vibración y un movimiento violento de la tubería y la posible ruptura del equipo.
- 15) *Fuego.* El fuego es una causa de sobrepresión debido a la vaporización del líquido contenido en recipientes o bien al incremento de temperatura de gases a volumen constante.
- 16) *Cambios del proceso/Reacciones químicas.* En algunas reacciones y procesos, la falta en el control del proceso puede provocar cambios significativos en temperatura y/o presión; como resultado se pueden exceder los límites establecidos de los materiales. En donde se procesen fluidos criogénicos, una reducción de la presión puede disminuir la temperatura de los fluidos debajo de la temperatura mínima permisible de diseño del equipo, con el consecuente riesgo de fragilidad o ruptura por baja temperatura. Para reacciones exotérmicas (descomposiciones, diluciones ácidas, polimerización), se pueden generar temperaturas y/o

presiones excesivas asociadas con reacciones paralelas que pueden reducir los niveles de esfuerzo permisible debajo del punto de diseño, o incrementar la presión sobre la máxima presión permisible de trabajo. Cuando los accesorios de relevo de presión normales no puedan proteger contra estas situaciones, se requieren controles para prevenir los cambios de temperatura o presión.

Una fuente potencial de sobrepresión es el error de algún operador provocando fallas en el sistema o proceso por dejar cerrada una válvula o por el contrario abierta, causando ésta circunstancia una sobrepresión. Generalmente algunos de estos casos pueden clasificarse en las fallas anteriores, pero es necesario hacer un análisis cuidadoso de riesgos para evitar imprevistos.

Es necesario en cada una de estas fallas el determinar cuál es el gasto a relevar que se tendrá en cada caso, así como la temperatura y presión de relevo para poder dimensionar el equipo de una manera más acertada.

Para realizar esta tarea, con base en el API 520⁽³⁾ se reporta que no se debe considerar más de una de estas fallas a la vez, salvo que en el análisis se observe que una de ellas puede provocar en algún caso alguna de las otras.

Es por esto que el SRP se debe dimensionar para el caso más crítico ya que si se dimensiona para todos los casos juntos, el tamaño del equipo de relevo puede ser excesivo.

1.1.2.3. Dimensionamiento de Dispositivos de Relevo de Presión⁽³⁾.

El primer paso en el diseño es el de considerar las contingencias que pudieran causar sobrepresión y evaluarlas en términos de la presión generada y las relaciones de cada uno de los fluidos que deban ser relevados. El diagrama de flujo de proceso, el balance de materia, los diagramas de tuberías e instrumentación, las hojas de especificaciones de los equipos y las bases de diseño serán necesarias para determinar la relación de relevo para cada uno de los dispositivos de relevo presión.

Para llevar a cabo el dimensionamiento de una válvula de seguridad, se requiere ante todo del conocimiento de la masa a relevar y sus características, para ello, previamente se desarrolló un análisis cuidadoso de causas y efectos de fallas operacionales y no operacionales del sistema de proceso.

En el dimensionamiento de los dispositivos de relevo se consideran las siguientes características:

1.1.2.3.1. Presión de Ajuste.

Existen varios criterios para determinar la presión de ajuste que difieren entre sí. Lo común y más práctico, es que la presión de ajuste, sea igual a la presión de diseño del equipo al cual se esta protegiendo. Cuando una sola válvula esta protegiendo a dos o más equipos, la presión de ajuste será igual a la menor presión de diseño entre ambos. Cuando la protección se esta dando a tuberías el criterio anterior no es aplicable. En estos casos quedan a criterio de la persona que esta diseñando, el fijar la presión de ajuste.

1.1.2.3.2. Temperatura de Relevo.

Esta es otra característica del sistema, necesaria para el dimensionamiento de la válvula. La temperatura de relevo puede variar para un mismo fluido dependiendo de la causa de relevo. Por ejemplo el caso de fuego, el líquido contenido en un recipiente se vaporizará, de modo que la temperatura de relevo, será la temperatura de saturación a la presión de relevo; si este mismo equipo se protege de descarga bloqueada, la temperatura de relevo es igual a la temperatura de operación normal.

En un recipiente expuesto a fuego que contenga únicamente gas, la temperatura de relevo será la que dicho gas adquiera al elevarse su presión a la presión de relevo a volumen constante.

La determinación de temperatura de relevo estará de acuerdo a la causa de relevo.

En el caso de falla de reflujo y falla de agua de enfriamiento puede considerarse la temperatura de relevo, igual a la temperatura normal de salida de domos.

En caso de expansión térmica, la temperatura de relevo será ligeramente mayor que la temperatura normal de operación del líquido.

En la ruptura de tubos deberá considerarse el efecto de mezcla de las corrientes "fría" y "caliente" para determinar la temperatura de relevo.

En las demás fallas, deberá analizarse con detalle la temperatura de relevo.

La temperatura de relevo, además de intervenir en el dimensionamiento de la válvula, servirá también para la especificación de materiales.

1.1.2.3.3. Sobrepresión.

Cuando en una válvula de relevo, la presión corriente abajo alcanza la presión de ajuste, empieza la apertura del dispositivo y empieza a comprimirse el

resorte. Consecuentemente la fuerza para seguirlo comprimiendo y a lograr apertura máxima también se requiere una mayor fuerza. Esta fuerza extra, se logra al permitir que la presión en el equipo protegido se eleve un poco con respecto a la presión de ajuste, es decir, permitiendo que exista una sobrepresión.

Las válvulas que manejan gas o vapor reciben una fuerza adicional proveniente del cambio de energía cinética producido por la expansión del gas, en consecuencia la sobrepresión requerida en gases y vapores es pequeña, de 3-10 %.

En el caso de manejar líquidos que no vaporicen, dado que no se tienen los efectos de expansión, la sobrepresión requerida es grande (25%)

La sobrepresión se expresa como un por ciento de la presión de ajuste, y los valores comúnmente utilizados son mostrados en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Valores de sobrepresión comúnmente usados.

Para protección contra fuego	21%
Para expansión térmica de líquidos en tuberías y descarga de bombas	25%
Equipos ASME Sección VIII ⁽⁷⁾	10%
Equipos ASME Sección I ⁽⁷⁾	3%

1.1.2.3.4. Área de Flujo Requerida

El cálculo de una válvula de relevo, consiste en encontrar un área tal que permita el paso de la masa necesaria a las condiciones establecidas.

La válvula se diseña para la causa que requiera mayor área. Esta causa es comúnmente la de mayor flujo a aliviar, pero debe comprobarse el área requerida de acuerdo con las condiciones de cada caso.

Al haber diseñado para la causa de mayor área requerida, se garantiza que existirá un área suficiente y adecuada para todas las demás causas.

El cálculo del área requerida, se logra con las ecuaciones que a continuación se presentan:

1.1.2.3.4.1. Dimensionamiento para Flujo Crítico.

Las PSV en servicio de gas o vapor que operan a flujo crítico pueden ser dimensionadas usando las ecuaciones 1.1 a 1.3 Cada una de las ecuaciones pueden ser usadas para calcular el área efectiva de descarga, A, requerida para manejar un flujo requerido a través de la PSV.

Unidades Acostumbradas del Sistema Ingles:

$$A = \frac{W}{CK_d P_1 K_b K_c} \sqrt{\frac{TZ}{M}} \quad (1.1)$$

$$A = \frac{V \sqrt{TZM}}{6.32 CK_d P_1 K_b K_c} \quad (1.2)$$

$$A = \frac{V \sqrt{TZG}}{1.175 CK_d P_1 K_b K_c} \quad (1.3)$$

Unidades del SI (Sistema Internacional):

$$A = \frac{13,160 W}{CK_d P_1 K_b K_c} \sqrt{\frac{TZ}{M}} \quad (1.1)$$

$$A = \frac{35,250 V \sqrt{TZM}}{CK_d P_1 K_b K_c} \quad (1.2)$$

$$A = \frac{189,750 V \sqrt{TZG}}{CK_d P_1 K_b K_c} \quad (1.3)$$

Donde:

A = Área efectiva de descarga requerida del accesorio, in² [mm²].

W = Flujo requerido a través del dispositivo, lb/hr [kg/hr].

C = Coeficiente determinado de una expresión de la relación de los calores específicos ($k = C_p/C_v$) del gas o vapor a la entrada de las condiciones de relevo. Esta puede ser obtenida de la figura 1.10, donde k no pueda ser determinada, se sugiere que sea usado un valor de C igual a 315. Las unidades para C son

$$\frac{\sqrt{\text{lb}_m \times \text{lb}_{\text{mol}} \times R}}{\text{lb}_f \times \text{hr}}$$

K_d = Coeficiente efectivo de descarga. Para diseños preliminares, use los siguientes valores:

= 0.975 cuando una válvula de relevo de presión es instalada con o sin un disco de ruptura en combinación,

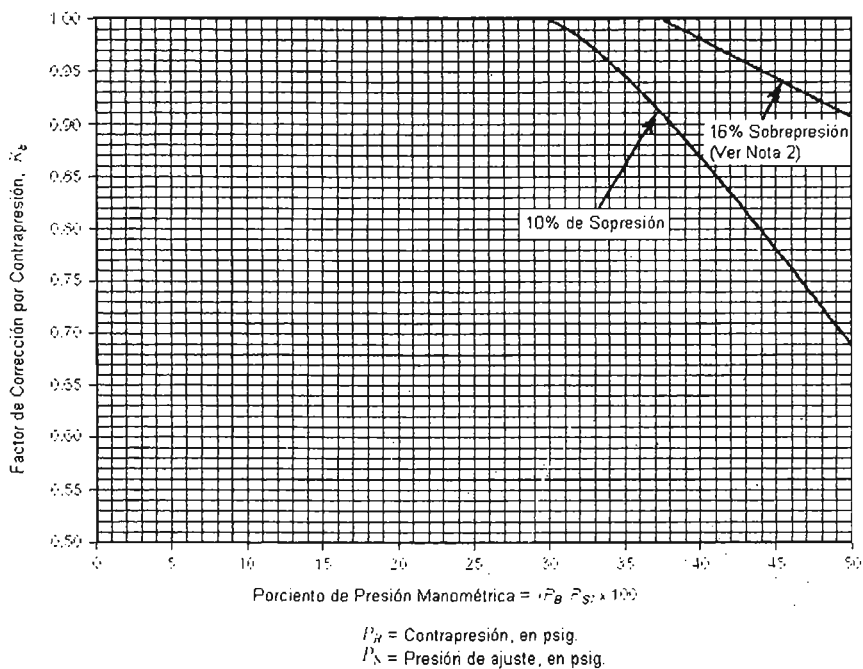
= 0.62 cuando se dimensiona un disco de ruptura.

P₁ = Presión de relevo corriente arriba, psia [KPa]. Esta es la presión de ajuste mas la sobrepresión permisible mas la presión atmosférica.

K_b = Factor de corrección de capacidad debido a la contrapresión. Puede ser obtenido de literatura del fabricante o estimada para cálculos

preliminares de la figura 1.10. El factor de corrección por contrapresión aplica a válvulas de fuelles balanceadas únicamente. Para válvulas convencionales y operadas por piloto, usar un valor para K_b igual a 1.0.

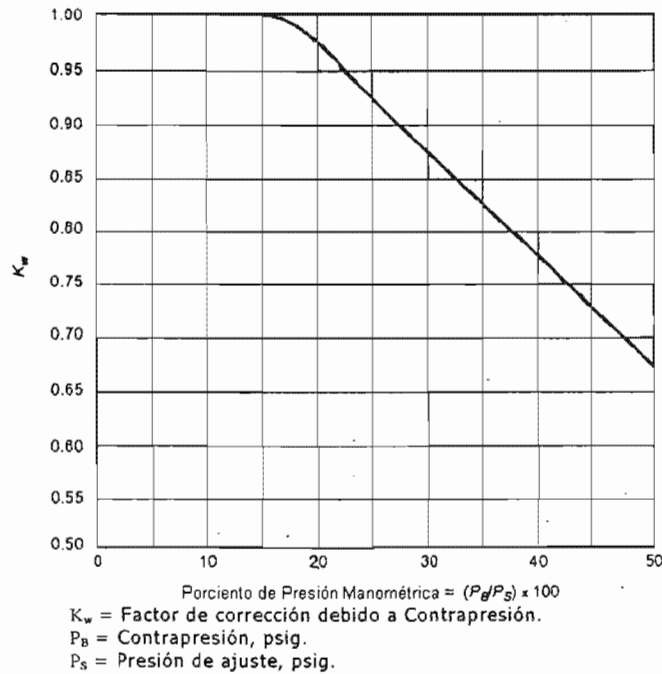
- K_c = Factor de corrección por combinación para instalaciones con un disco de ruptura corriente abajo de la PSV.
 = 1.0 cuando no se ha instalado disco de ruptura.
 = 0.9 cuando esta instalado un disco de ruptura en combinación con una PSV y la combinación no tiene un valor publicado.
- T = Temperatura de relevo del gas o vapor de entrada, R ($^{\circ}\text{F} + 460$) [K ($^{\circ}\text{C} + 273$)].
- Z = Factor de compresibilidad para la desviación del gas actual de un gas perfecto, una relación evaluada a las condiciones de relevo de entrada.
- M = Peso molecular del gas o vapor a la entrada de las condiciones de relevo, $\text{lb}_m/\text{lb}_{\text{mol}}$ [kg/ k_{mol}].
- V = Flujo requerido a través del accesorio, scfm a 14.7 psia y 60 $^{\circ}\text{F}$ [Nm³/min a 0 $^{\circ}\text{C}$ y 101.325 kPa].
- G = Densidad relativa del gas a condiciones estándar referidas a condiciones estándar del aire [condiciones normales], en otras palabras, G = 1 para aire a 14.7 psia y 60 $^{\circ}\text{F}$ [101.325 kPa y 0 $^{\circ}\text{C}$].



Notas:

1. Las curvas arriba representan un compromiso de los valores recomendados por un número de fabricantes de la válvula de descarga y puede ser utilizado cuando la marca de la válvula o la presión del punto crítico del flujo para el vapor o el gas es desconocida. Cuando la marca de la válvula se conoce, se debe consultar al fabricante para el factor de corrección. Estas curvas están dadas para presiones del sistema de 50 psig y mayores. Se limitan a la contrapresión debajo de la presión de flujo crítico para una presión de ajuste dada. Para las presiones del sistema debajo de 50 psig o para el flujo subcrítico, el fabricante debe ser consultado para los valores de K_b .
2. Vea el párrafo referente a contrapresión⁽¹⁾.
3. Para la sobrepresión 21%, K_b es igual a 1.0 hasta $P_R/P_A = 50\%$.

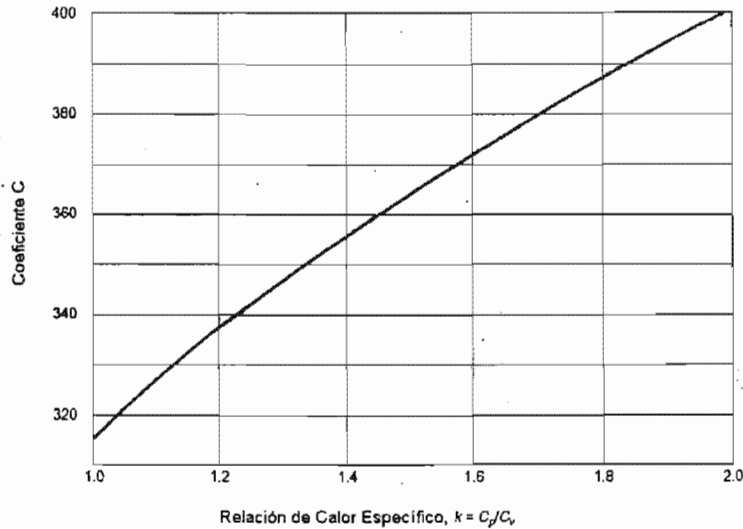
Figura 1.10. Factor de Corrección por Contrapresión, K_b , para PSV Balanceadas de Fuelles (Vapor y Gases).



Notas:

1. La curva anterior representa valores recomendados por diversos fabricantes. Esta curva puede utilizarse cuando no se conoce al fabricante. Si no, puede consultarse al fabricante para el factor de corrección aplicable.

Figura 1.11. Factor de corrección de capacidad, K_w , debido a la contrapresión, en PSV de fueles balanceada en servicio de líquido.



Notas:

1. La ecuación para esta curva es

$$C = 520 \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{0.25(k-1)}}$$

2. Las unidades para el coeficiente C son $\sqrt{\text{lb}_m/\text{mol} \cdot \text{R}/\text{lb}_m \cdot \text{hr}}$

Figura 1.12. Curva para evaluar el coeficiente C en la ecuación de flujo de la relación de calor específico considerando gas ideal.

1.1.2.3.4.2. Dimensionamiento para Flujo Subcrítico: Gas o Vapor.

1.1.2.3.4.2.1. PSV convencional y operada por piloto.

Cuando la relación de contrapresión a presión de entrada excede la relación de presión crítica P_{cf}/P_1 , el flujo a través del DRP es subcrítico. Las ecuaciones 1.4 a 1.6 pueden usarse para calcular el área efectiva de descarga para PSV convencionales y operadas por piloto.

Unidades Acostumbradas del Sistema Ingles:

$$A = \frac{W}{735 F_2 K_d K_c} \sqrt{\frac{ZT}{MP_1(P_1 - P_2)}} \quad (1.4)$$

$$A = \frac{V}{4645 F_2 K_d K_c} \sqrt{\frac{TZM}{P_1(P_1 - P_2)}} \quad (1.5)$$

$$A = \frac{V}{864 F_2 K_d K_c} \sqrt{\frac{TZG}{P_1(P_1 - P_2)}} \quad (1.6)$$

Unidades del SI:

$$A = \frac{17.9 W}{F_2 K_d K_c} \sqrt{\frac{ZT}{MP_1(P_1 - P_2)}} \quad (1.4)$$

$$A = \frac{47.95 V}{F_2 K_d K_c} \sqrt{\frac{TZM}{P_1(P_1 - P_2)}} \quad (1.5)$$

$$A = \frac{258 V}{F_2 K_d K_c} \sqrt{\frac{TZG}{P_1(P_1 - P_2)}} \quad (1.6)$$

Donde:

P_2 = Contrapresión, psia [kPa].

F_2 = coeficiente de flujo subcrítico, ver figura 1.13 para obtener los valores o usar la siguiente ecuación:

$$= \sqrt{\left(\frac{k}{k-1}\right) (r)^{\frac{2}{k}} \left[\frac{1-r^{\frac{(k-1)}{k}}}{1-r} \right]}$$

k = relación de calores específicos.

r = relación de contrapresión en la presión de relevo corriente arriba, P_2/P_1 .

Los demás parámetros se definieron anteriormente.

1.1.2.3.4.2.2. PSV Balanceadas.

Las PSV balanceadas deberán ser dimensionadas usando las ecuaciones 1.1 a la 1.3. El factor de corrección por contrapresión en esta aplicación considera las velocidades de flujo que son subcríticas así como la tendencia para que el disco caiga debajo de la elevación completa. (El uso de ecuaciones de velocidad subcrítica son apropiadas solo donde se mantiene un levantamiento total). El factor de corrección por contrapresión, K_b , para esta aplicación deberá ser obtenida del fabricante.

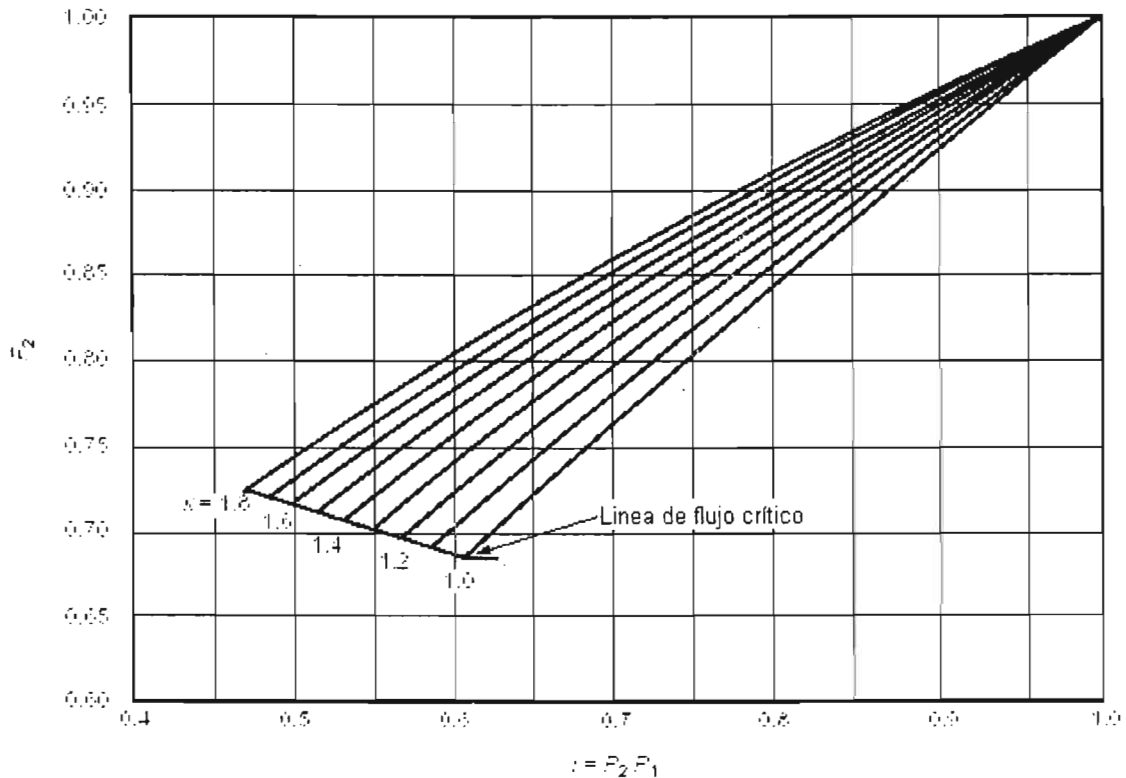


Figura 1.13. Valores de F_2 para flujo subcrítico.

1.1.2.3.4.3. Dimensionamiento para relevo de líquido: PSV que requieren certificación de capacidad.

Las válvulas en servicio de líquido son diseñadas en acuerdo con el código ASME Sección VIII, División I ⁽⁷⁾, con requerimiento de una certificación de capacidad pueden ser inicialmente dimensionadas usando la ecuación 1.7.

Unidades Acostumbradas del Sistema Ingles:

$$A = \frac{Q}{38 K_d K_w K_c K_v} \sqrt{\frac{G}{p_1 - p_2}} \quad (1.7)$$

Unidades del SI:

$$A = \frac{11.78 Q}{K_d K_w K_c K_v} \sqrt{\frac{G}{p_1 - p_2}} \quad (1.7)$$

Donde:

K_w = Factor de corrección debido a la contrapresión. Si la contrapresión es atmosférica, use un valor para K_w de 1.0. Válvulas de fuelles balanceadas en servicio de contrapresión requerirán el factor de corrección de la figura 1.11. Válvulas convencionales y operadas por piloto no requieren una corrección especial.

K_v = Factor de corrección debido a la viscosidad como es determinada de la figura 1.14 o de la siguiente ecuación:

$$= \left(0.9935 + \frac{2.878}{Re^{0.5}} + \frac{342.75}{Re^{1.5}} \right)^{-0.1}$$

p_1 = Presión de relevo corriente arriba, psig [kPag]. Esta es la presión de ajuste mas la sobrepresión permisible.

p_2 = Contrapresión, psig [kPag].

Los demás parámetros se definieron anteriormente.

Para el cálculo de K_w es necesario evaluar el número de Reynolds, el cual puede ser obtenido mediante las ecuaciones 1.8 o 1.9

Unidades Acostumbradas del Sistema Ingles:

$$Re = \frac{Q(2800 G)}{\mu \sqrt{A}} \quad (1.8)$$

$$Re = \frac{12,700 Q}{U \sqrt{A}} \quad (1.9)$$

Unidades del SI:

$$Re = \frac{Q(18,800 G)}{\mu\sqrt{A}} \quad (1.8)$$

$$Re = \frac{85,220 Q}{U\sqrt{A}} \quad (1.9)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

Q = Flujo a la siguiente temperatura, gpm (litros/min).

G = Densidad relativa del líquido a la siguiente temperatura referida a las condiciones estándar del agua.

μ = Viscosidad absoluta a la temperatura siguiente, centipoise.

A = Área efectiva de descarga, in² (mm²).

U = Viscosidad a la temperatura siguiente, en SSU.

1.1.2.3.4.4. Dimensionamiento para relevo de líquido: PSV que no requiere certificación de capacidad.

Este método resultará típicamente en un sobrediseño en el diseño donde una válvula de líquido es usada para una aplicación con 10% de sobrepresión. Un factor de corrección K_p de 0.6 es usado para esta sustitución.

Unidades Acostumbradas del Sistema Ingles:

$$A = \frac{Q}{38 K_d K_w K_c K_v K_p} \sqrt{\frac{G}{1.25p - p_b}} \quad (1.10)$$

Unidades del SI:

$$A = \frac{11.78 Q}{K_d K_w K_c K_v K_p} \sqrt{\frac{G}{1.25p - p_b}} \quad (1.10)$$

Donde:

K_p = Factor de corrección debido a la sobrepresión. A 25% de sobrepresión, $K_p = 1.0$. Para sobrepresiones excepto para 25%, K_p esta determinado de la figura 1.15.

p = Presión de ajuste, psig [kPag].

p_b = Contrapresión total, psig [kPag].

Los demás parámetros se definieron anteriormente.

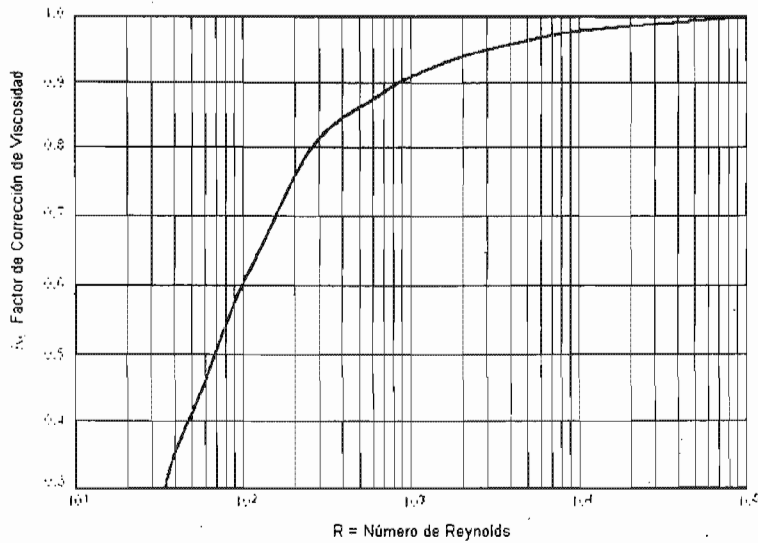


Figura 1.14. Factor de corrección de capacidad, K_v , debido a la viscosidad.

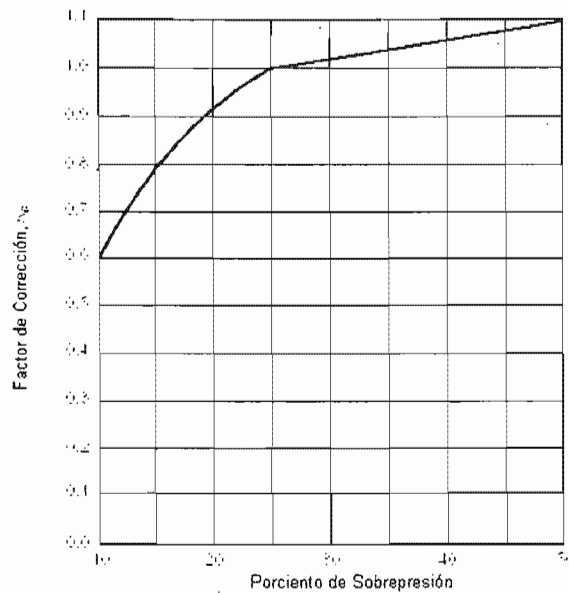


Figura 1.15. Factores de corrección de capacidad debido a la sobrepresión para PSV no certificadas en servicio de líquido.

1.1.2.3.5. Determinación de los Orificios Nominales.

Una vez que se ha calculado el orificio de la válvula se debe elegir el tamaño estándar inmediato superior al calculado. Estos orificios se denominan por letras que corresponden a los siguientes tamaños:

Tabla 1.2. Orificios Nominales⁽⁶⁾.

Designación de orificio.	Área efectiva.	
	in ²	cm ²
D	0.110	0.709676
E	0.196	1.264514
F	0.307	1.980641
G	0.503	3.245155
H	0.785	5.064506
J	1.287	8.303210
K	1.838	11.858041
L	2.853	18.416415
M	3.600	23.225760
N	4.340	27.999944
P	6.380	41.161210
Q	11.050	71.290180
R	16.000	103.22560
T	26.000	167.74160

Una vez que se ha elegido el orificio estándar, en una carta de selección proporcionada por el fabricante, que es una adaptación del API-526⁽⁶⁾, se elige el tipo de válvula.

1.1.2.3.6. Boquillas de Entrada y Salida.

La selección más elemental de la válvula de seguridad se complementa con la determinación del diámetro de las boquillas de entrada y salida.

El documento API-Standard 526⁽⁶⁾, en sus tablas 2-5 define los tamaños y el libraje de las boquillas tomando como base la presión de relevo y la temperatura de relevo, también, de acuerdo a la temperatura de relevo, recomienda el material mínimo necesario para el cuerpo de la válvula y para el resorte. Asimismo, en las tablas indicadas, se marcan los límites de presión y temperatura para cada tamaño de orificio y para el libraje de las bridas.

El tamaño de la válvula de seguridad se designa comúnmente por: el diámetro nominal de la boquilla de entrada, la letra que designa el orificio seleccionado, y el diámetro nominal de la boquilla de salida.

1.1.2.3.7. Diseño de los Dispositivos de Disco de Ruptura.

Aquí podemos encontrar dos situaciones.

1.1.2.3.7.1. *Dispositivos de Disco de Ruptura Independientes.*

Los dispositivos de disco de ruptura pueden ser usados solos o en combinación con la válvula de relevo de presión en servicio con gas o vapor y en servicio con líquido. El diseño del disco de ruptura usado como único esta basado en las ecuaciones aplicables para las válvulas de relevo de presión usadas para todos los fluidos con un coeficiente efectivo de descarga de $K_d = 0.62$.

El área de descarga requerida, A , es determinada usando la ecuación apropiada para el medio de flujo. El dispositivo de disco de ruptura seleccionado deberá ser del tamaño nominal cuya área sea igual o mayor al área de descarga requerida calculada a partir de la ecuación apropiada.

Para los dispositivos de discos de ruptura que tengan un miembro estructural (por ejemplo, una hoja de navaja o soporte a vacío) que reduce el área de descarga efectiva después del estallido, el área proyectada del miembro estructural es deducida a partir del área de flujo de la tubería para determinar el área neta de la tubería de descarga.

En el uso de $K_d = 0.62$ para determinar la capacidad de un disco de ruptura, o inversamente, el área requerida para la cantidad de flujo dado, el usuario deberá estar vigilando las siguientes limitaciones:

A) El dispositivo de disco de ruptura es usado dentro de un rango de tamaño y presión que el constructor ha determinado obteniendo una abertura satisfactoria para el estilo del disco de ruptura en servicio con el fluido.

B) El dispositivo de disco de ruptura es instalado dentro de un sistema de tubería corta no adicionando resistencia al flujo en el dispositivo de disco de ruptura.

Si un disco de ruptura descarga dentro de un sistema de venteo o en un sistema de quemado cerrado, usualmente no contribuye a las pérdidas de presión obtenidas en la tubería de descarga. El diseño de la tubería de entrada y de descarga llega a ser un problema en el diseño de la línea que emplea la relación de relevo y la máxima presión de entrada permisible definida por el código que aplique. En general, una pérdida de presión a través de un disco de ruptura de aproximadamente 75 veces el diámetro puede ser usado. El distribuidor deberá ser consultado si se requieren valores más precisos. Este problema es similar al diseño de la línea de un proceso excepto que el efecto de la expansión volumétrica sobre las pérdidas de presión se debe considerar.

Esto incluirá un efecto de aceleración (el vapor esta saliendo de la tubería de descarga a una velocidad alta) así como el efecto de la densidad a la descarga. Si la línea de venteo, subsecuentemente, descarga dentro de los cabezales de tamaños variados. Las restricciones del flujo crítico deberán ser consideradas.

1.1.2.3.7.2. Dispositivos de Discos de Ruptura usados en combinación con las Válvulas de Relevo de Presión.

Una aplicación importante del dispositivo de disco de ruptura es la entrada de una válvula de relevo de presión. El diseño de la combinación entre la válvula de relevo y el dispositivo de disco de ruptura requiere que la válvula de relevo, sea diseñada primero para determinar la capacidad de relevo requerida. La capacidad certificada y publicada de la válvula de relevo de presión usada es, entonces, multiplicada por el factor de capacidad combinada, K_c , para determinar la capacidad de la combinación.

El tamaño de la tubería a partir del recipiente protegido a la entrada de la válvula de relevo de presión deberá ser igual o mayor que el tamaño nominal de la conexión a la entrada de la válvula para permitir la capacidad de flujo suficiente y el desempeño de la válvula.

El diseño de la tubería a partir del recipiente protegido a la entrada de la válvula de relevo de presión es crucial para el funcionamiento apropiado de la válvula. El usuario deberá consultar los códigos ingenieriles aplicables (API ⁽⁴⁾, etc.) como guía para el diseño de la tubería de entrada. A menos que el dispositivo de relevo de presión sea instalado directamente en el recipiente, una buena práctica es la de analizar las pérdidas de presión por fricción a partir del recipiente hasta la entrada de la válvula a la capacidad de relevo para cumplir con los límites recomendados.

1.1.3. Dimensionamiento del cabezal del SRP.

El cálculo de los SRP se lleva a cabo normalmente como si el sistema fuera una red de tubería sujeta a un estado estable o régimen permanente de flujo.

La cantidad total de gas a relevar, será la suma de los gastos que cada válvula releva; sin tomar en cuenta el tiempo de falla como si la válvula estuviera desfogando continuamente.

Este es el caso más crítico y por lo tanto si diseñamos para estas condiciones, estaremos siempre del lado seguro.

Solamente se tratará el caso de desfogue de fluidos compresibles siempre en una sola fase.

1.1.3.1. Criterios de Diseño.

Para llevar a cabo el dimensionamiento del cabezal del sistema de relevo de presión, deben tomarse en cuenta los siguientes criterios de diseño:

1.1.3.1.1. Tubería de entrada al Dispositivo de Relevo de Presión.

- Excesiva caída de presión entre el recipiente protegido y la entrada de la válvula de relevo de presión (PSV por sus siglas en ingles) afectará adversamente a la capacidad del sistema y la estabilidad del mismo (castaño "Chattering").
- Cuando una PSV se instala directamente a un recipiente la caída de presión (ΔP) entre el dispositivo de relevo de presión y el recipiente no debe exceder del 3% de la presión de ajuste de la válvula, evaluada a condiciones de relevo. Sección 2.2.2 API-520, Part-II ⁽⁴⁾.
- El diámetro de entrada debe ser igual o mayor al tamaño nominal de entrada de la PSV.
- La tubería de entrada debe ser autodrenable.

1.1.3.1.2. Requerimientos del Cabezal de Relevo.

- El diseño del cabezal de desfogue se efectúa a condiciones de alta velocidad (en ocasiones cercanas a la sónica), lo cual le confiere la peculiaridad de su dimensionamiento.
- Se busca un diámetro tal que no genere una ΔP mayor a la disponible del sistema.
- Diseñar un sistema de seguridad que proteja la planta contra emergencias razonables a un costo mínimo.

1.1.3.1.3. Factores que Afectan el Diseño del Cabezal de Relevo.

Dentro de los factores que afectan el diseño del cabezal de relevo podemos encontrar.

1.1.3.1.3.1. Distribución Física de la Planta.

Aquí se toma en cuenta la ubicación de los diferentes equipos, para poder determinar las longitudes que tendrán los diferentes tramos de tubería que integrarán la red y el cabezal que componen el SRP.

1.1.3.1.3.2. Proceso que se lleva a cabo.

Es importante conocer el tipo de proceso que se lleva a cabo debido a que los equipos y fluidos usados en éste, influyen en el dimensionamiento del cabezal como se menciona en páginas anteriores.

1.1.3.1.3.3. Máxima Descarga Simultánea a los Cabezales.

Generalmente la causa que maneja la mayor masa total simultánea; es la que gobierna el dimensionamiento del cabezal de relevo; sin embargo se debe

analizar las propiedades del fluido a relevar (por ejemplo PM, T, P, Volumen, etc.).

1.1.3.1.3.4. *Máxima Caída de Presión Disponible.*

La máxima contrapresión permisible en el cabezal se establece de acuerdo a la presión de relevo más baja. Cuando a la contrapresión permisible de la válvula con la presión de ajuste más baja, se le resta la presión de salida del cabezal o sistema, se obtiene la caída de presión disponible o permisible.

Cuando a un cabezal se integran válvulas que releven a alta y baja presión, el diámetro de cabezal esta dominado por las válvulas de baja presión. Si estas válvulas no se integran a ese cabezal, el tamaño se reducirá enormemente. Puede convenir entonces el hacer una separación entre válvulas de alta presión y válvulas de baja presión enviando la descarga de ellas a un cabezal de alta presión y un cabezal de baja presión respectivamente.

El valor que define si una válvula se conecta al cabezal de alta o de baja presión es totalmente arbitrario. También puede separarse en desfogue frío y desfogue caliente, o desfogue húmedo y desfogue seco. La separación siempre dependerá del tipo de planta y de los fluidos que se manejan.

Por tanto tenemos:

- Bajas ΔP disponibles generan diámetros grandes.
- Evidentemente las PSV's balanceadas nos permitirán obtener diámetros menores en el cabezal de desfogue.
- Si se segregan las PSV's en función de la presión de relevo los diámetros tienden a disminuir. En consecuencia es conveniente tener un cabezal de desfogue de alta y uno de baja presión.
- Es conveniente segregar sustancias en función de sus características corrosivas o erosivas. Por lo cual puede haber desfogues ácidos.

1.1.3.1.3.5. *Condiciones Sónicas.*

Existe una limitación en la velocidad de un fluido en una línea de tubería y esta es que no es posible rebasar la velocidad del sonido en el gas a las condiciones de presión y temperatura dadas.

Por otra parte tenemos que un fluido que se expande en una tubería tiene una velocidad y una presión límite, la cual es idéntica a la velocidad del sonido y la presión crítica (Crocker Sabin 1945⁽²²⁾). Por ello, el máximo flujo que una tubería puede manejar esta limitado por la velocidad sónica la cual se define como:

$$V_2 = 68.3 \sqrt{k P_2 v_2} \quad (1.11)$$

De igual forma definimos la presión crítica o sónica de la siguiente forma:

$$P_2 = \frac{W \left[\frac{RT_2}{k(k+1)} \right]^{1/2}}{d^2 11400} \quad (1.12)$$

Donde:

V_2 = Velocidad sónica [=] ft/s.

k = C_p/C_v

v_2 = Volumen específico al final del sistema [=] ft^3/lb .

P_2 = Presión a la salida de la línea [=] psia.

d = Diámetro interno [=] in. Se evalúa como diámetro sónico

R = 1544/Peso molecular del gas

W = Flujo de vapor [=] lb/h

T = Temperatura a la salida [=] R

1.1.3.2. Modelo Matemático.

Las ecuaciones disponibles para calcular la ΔP en fluidos compresibles, donde la velocidad es menor que la velocidad sónica y en donde la velocidad y el volumen específico cambian constantemente, son generalmente tediosas e invariablemente en términos de las condiciones iniciales a la salida de la PSV; lo cual en principio es desconocido.

La determinación exacta de la pérdida de presión en un fluido compresible que circula por una tubería requiere un conocimiento de la relación entre presión y volumen específico; esto no es fácil de determinar para cada problema en particular.

Los casos extremos considerados normalmente son el flujo adiabático, y el flujo isotérmico.

El flujo adiabático se supone que ocurre en tuberías cortas y bien aisladas; esto se debe a que no se transfiere calor desde o hacia la tubería, excepto la pequeña cantidad de calor que se produce por fricción que se añade al flujo.

El flujo isotérmico se considera que ocurre muy a menudo; y es la forma más conservadora de diseño.

El caso real oscila entre la relación de presión y volumen puede adoptar cualquier forma; llamado flujo politrópico, la información específica en cada caso es prácticamente imposible.

Partiendo de la ecuación de Movimiento:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (1.13)$$

Dicha representación es una descripción de las variaciones que tiene lugar en un elemento que sigue el movimiento del fluido para cualquier medio continuo.

$\rho \frac{DV}{Dt}$ Es la masa por unidad de volumen multiplicada por la aceleración.

∇p Fuerza de presión sobre el elemento por unidad de volumen.

$[\nabla \cdot \tau]$ Fuerza viscosa sobre el elemento por unidad de volumen.

ρg Fuerza gravitatoria sobre el elemento por unidad de volumen.

Si en la ecuación se desprecian las fuerzas viscosas sobre el elemento por unidad de volumen $[\nabla \cdot \tau]$, la ecuación se reduce a:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p - \rho g \quad (1.14)$$

En coordenadas rectangulares la ecuación vectorial se convierte en:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) &= \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \\ \rho \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) &= \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \\ \rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) &= \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \end{aligned} \quad (1.15)$$

Considerando régimen permanente, flujo unidimensional, aplicación del vector de gravedad en la dirección perpendicular al flujo; se obtiene la *ecuación de Euler*:

$$\frac{g_c}{g} \left(\frac{1}{\rho} \right) dp + \left(\frac{1}{g} \right) V dV + dz = 0 \quad (1.16)$$

El flujo de fluidos en tuberías esta siempre acompañado de rozamiento de partículas del fluido entre sí, y consecuentemente, por la pérdida de energía disponible; en otras palabras, tiene que existir una pérdida de presión en el sentido del flujo. Con base en la ecuación de Euler y considerando que el fluido es no ideal, es decir, se presentan pérdidas por fricción, h_L , se obtiene

$$\frac{g_c}{g} \left(\frac{1}{\rho} \right) dp + \left(\frac{1}{g} \right) V dV + dz + h_L = 0 \quad (1.17)$$

Cálculo del h_L : Pérdidas por fricción (Ecuación de Darcy)

$$h_L = f \frac{LV^2}{D2g} \quad (1.17.1)$$

Para calcular el factor de fricción f es necesario obtener el número de Reynolds, para ello tenemos:

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu} \quad (1.18)$$

Para calcular el factor de fricción hacemos uso de las siguientes ecuaciones:

Para flujo laminar $Re < 2000$ usamos $f = \frac{Re}{64}$ (Ecuación de Fanny) (1.19)

Para flujo turbulento

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (\text{Ecuación de Colebrook}) \quad (1.20)$$

Partiendo de la ecuación de Euler se obtienen los modelos para el diseño del cabezal de sistemas de relevo de presión entre los que encontramos:

1.1.3.2.1. Método de Conison^(15, 16, 17, 50).

Este método se caracteriza por ser una ecuación a régimen isotérmico para condiciones subsónicas, con base en las condiciones finales de la red de tuberías o calculadas con la ecuación de Broker a condiciones sónicas o críticas.

Introduciendo las consideraciones:

Flujo isotérmico:

$$p_1 \bar{v}_1 = p \bar{v} = p_2 \bar{v}_2 = RT = \text{constante} \quad (1.21)$$

De la ecuación de continuidad

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} \quad (1.22)$$

Se obtiene:

$$\frac{2g_c \bar{v}_2}{V_2^2 p_2} \left(\frac{p_2^2 - p_1^2}{2} \right) + 2 \text{Ln} \left(\frac{V_2}{V_1} \right) + \frac{f}{D} l = 0 \quad (1.23)$$

En los casos donde las longitudes o los cambios de velocidad sean pequeños el término:

$2 \text{Ln} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$ se considera despreciable.

\bar{v}_2 = Volumen específico a la salida de la tubería [=] ft³/lb.

V_2 = velocidad del fluido a la salida de la tubería [=] ft/s.

P_1 = Presión inicial del sistema [=] lb/ft².

P_2 = Presión a la salida de la tubería [=] lb/ft².

Obteniéndose:

$$p_1 = \sqrt{\left(\frac{f l V_2^2 \rho_2}{2 g_c D} \right) (2 p_2) + p_2^2} \quad (1.24)$$

La ecuación de Conison se basa en las condiciones a la salida de la tubería, las cuales son conocidas al inicio del cálculo.

La consideración de temperatura constante proporciona un factor de seguridad; la temperatura del vapor a lo largo del cabezal será menor que la temperatura en la válvula debido a las pérdidas por expansión, conducción y radiación; el grado de enfriamiento depende de las condiciones climáticas y atmosféricas.

Como consecuencia de la consideración de temperatura constante en la tubería se asume un volumen mayor que el que existe realmente en el sistema lo cual tendrá como consecuencia un diámetro mayor de la red de tuberías; generando un cálculo conservador del sistema de tuberías.

1.1.3.2.2. Método de Missen^(40, 50).

Es una ecuación a régimen isotérmico para condiciones subsónicas; esta ecuación no considera longitudes en las líneas ni cambios en velocidad.

Introduciendo las consideraciones:

Flujo isotérmico:

$$p_1 \bar{v}_1 = p \bar{v} = p_2 \bar{v}_2 = RT = \text{constante}$$

De la ecuación de continuidad:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2}$$

$$\frac{p_i}{p_2} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^2 + 1 \right] - \frac{G^2 \bar{v}_2}{g_c p_2} \text{Ln} \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad (1.25)$$

$$\frac{p_i}{p_2} = 1 + \frac{2f G^2 V_2 l}{g_c D p_2} \quad (1.26)$$

G = masa velocidad [=] lb/(sft²).

P = presión del fluido [=] psia.

D = diámetro de la tubería [=] in.

\bar{v} = volumen específico [=] ft³/lb.

Subíndices:

1 = Condiciones a la entrada de la línea.

2 = Condiciones a la salida de la línea.

i = Condiciones de entrada ficticias.

Esta ecuación se resuelve de manera iterativa para P, o por medio de un nomograma.

1.1.3.2.3. Método de Mak.

Henry Y. Mak^(39, 50) desarrolló en 1978, un método de cálculo directo para evaluar la contrapresión desarrollada en la red de tuberías de desfogue considerando régimen isotérmico y la presión de salida del sistema; dicha ecuación es:

$$f \frac{L}{D} = \left(\frac{1}{M_2^2} \right) \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^2 \right] - \text{Ln} \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^2 \quad (1.27)$$

Donde:

f Factor de fricción de Moody

L Longitud equivalente [=] ft.

D Diámetro del cabezal [=] ft.

P₁ Presión absoluta de entrada [=] psia.

P₂ Presión absoluta de salida [=] psia.

M_2 Número de Mach a la salida del cabezal.

El número de Mach se evalúa con la siguiente ecuación:

$$M_2 = 1.336 \times 10^{-5} \left(\frac{W}{P_2 A^2} \right) \sqrt{\left(\frac{Z T}{P M} \right)} \quad (1.28)$$

Para cabezales de alta presión, el flujo puede ser sónico a la salida, igualmente al verificar unidades en operación o al modificar es muy común encontrar condiciones críticas en algunas uniones del sistema debido a la adición de válvulas de nuevas torres o equipos que deben integrarse al cabezal; en estos casos, el método mencionado debe modificarse para verificar primero la presión de salida de cada segmento de tubería para determinar si existen condiciones de flujo crítico; la presión absoluta crítica a la salida bajo condiciones de flujo isotérmicas está dada por:

$$P_{\text{crit}} = \left(\frac{W}{408 D^2} \right) \sqrt{\left(\frac{Z T}{P M} \right)} \quad (1.29)$$

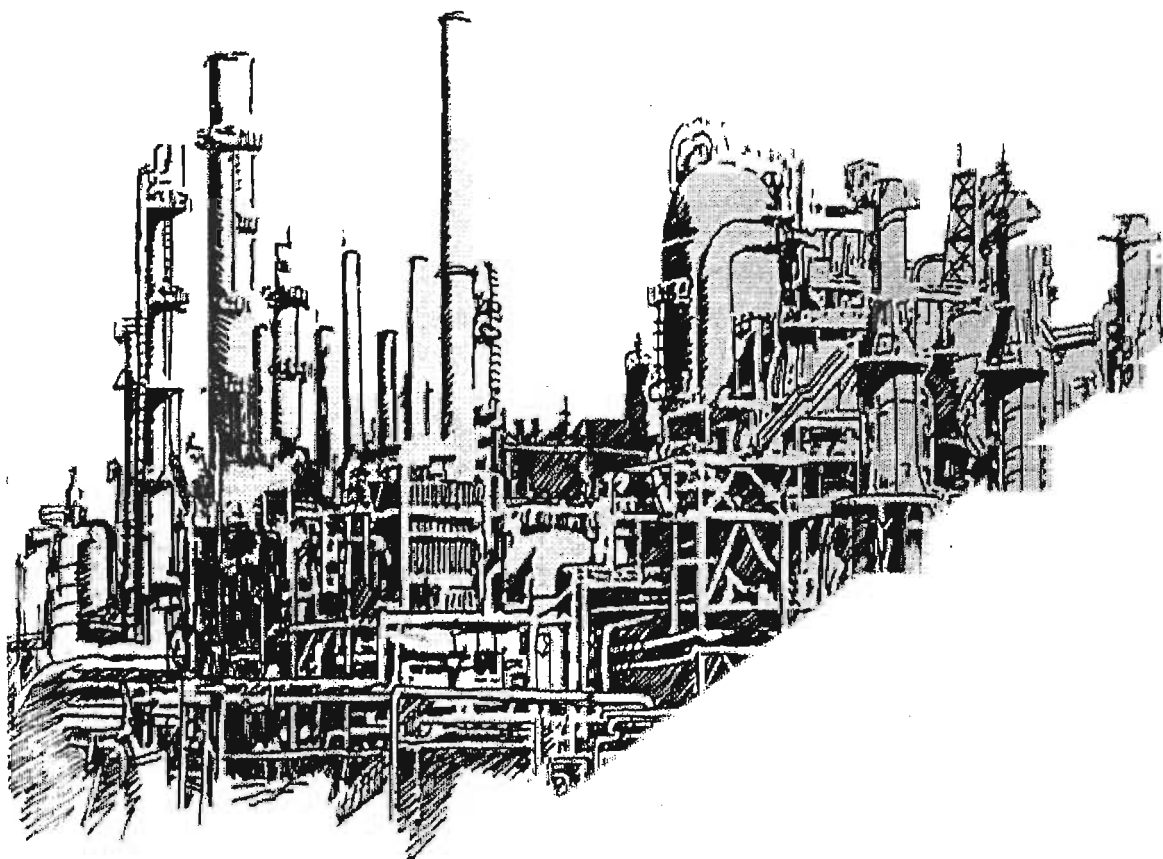
Si la presión crítica es menor que la presión a la salida, entonces el flujo es subcrítico y la presión de salida, P_2 , no se modifica y la presión de entrada, P_1 , se evalúa con la ecuación anterior. Si la presión crítica es mayor que la presión a la salida; el flujo es crítico y P_2 es igual a la presión crítica y la presión de entrada, P_1 , se evalúa asumiendo $M_2=1$.

En este trabajo en particular se empleara la ecuación de Conison debido a que proporciona un cálculo conservador y aceptable para el dimensionamiento del Sistema de Relevo de Presión.

Para el desarrollo de este estudio se considera que el cálculo de las válvulas de seguridad y la masa a relevar por cada una de ellas ya están calculadas.

CAPITULO 2.

ASPECTOS TEORICOS DE LA OPTIMIZACIÓN.



CAPITULO 2. ASPECTOS TEÓRICOS DE LA OPTIMIZACIÓN.

Los algoritmos de búsqueda abarcan prácticamente la gran mayoría de los problemas de optimización, en el presente capítulo nos referimos a aquellos algoritmos en los que dado el espacio de todas las posibles soluciones a un problema partiendo de una solución inicial, y que son capaces de encontrar la mejor solución o la única entre ellos los algoritmos genéticos. En muchos casos, la búsqueda está guiada por una función que indica lo buena que es esa solución, o bien el costo de la misma, lo cerca que se está de la solución final si es que se conoce. El problema se convierte entonces en un problema de optimización, es decir, encontrar la solución que maximiza la función objetivo, la función de evaluación, la aptitud o bien minimiza el costo.

Existen diversas formas de abordar problemas de optimización, en el presente capítulo se presentan los principios de la optimización así como algunos de los métodos utilizados para resolver problemas de optimización, haciendo mayor énfasis en las características de los algoritmos genéticos.

2.1. Metodologías para la Optimización.

2.1.1. Conceptos.

La Optimización estudia como describir y lograr lo "mejor" una vez que se conoce cómo medir o alterar lo "bueno" y lo "malo". Al optimizar es decir, obtener el óptimo, normalmente se desea lo *máximo* o *mínimo*. Por lo tanto, la Teoría de Optimización es el estudio cuantitativo del *óptimo* (óptimo implica una medida cuantitativa que involucra análisis matemático) y de los métodos para encontrarlo. En términos generales, la teoría de optimización es un conjunto de resultados matemáticos y métodos numéricos para encontrar e identificar el mejor candidato de una colección de alternativas sin tener que enumerar explícitamente y evaluar todas las alternativas posibles. Así, optimizar el diseño de una planta química se entiende como el encontrar los valores de los parámetros de diseño que maximicen la ganancia, o minimicen el consumo energético.

Muchas fases de la teoría de optimización se han conocido por los matemáticos desde hace siglos; sin embargo con el desarrollo de las computadoras los métodos se han vuelto más atractivos y se han desarrollado nuevas investigaciones en optimización.

La optimización tiene muchas aplicaciones en:

- Itinerario de un agente viajero.
- Diseño de equipos o plantas completas.
- Optimización de plantas de operación.
- Ajuste de curvas.

- Asignación de recursos.
- Transporte.
- Ruta crítica (PERT/CPM).
- Teoría de juegos.
- Síntesis de secuencias de Destilación.
- Síntesis de redes de intercambio térmico (HEN), etc.

Decidir como diseñar, construir, regular u operar un sistema físico o económico (Modelo de Optimización) involucra tres etapas:

- 1.- Se debe conocer y entender cuantitativa y exactamente cómo interactúa el sistema, (la mayor parte del esfuerzo de un estudio de optimización radica en entender y describir en términos de gráficas, programas de computadora o ecuaciones matemáticas).
- 2.- Se requiere una medida de efectividad del sistema expresado en términos de variables del propio sistema (Beneficios, costos, eficiencia, etc.). No siempre es fácil expresar la dependencia cuantitativa del sistema.
- 3.- Aplicación de la Teoría de optimización.

Un problema de optimización es un conjunto de variables o parámetros que representan un modelo matemático para analizar o entender un fenómeno determinado y consta de:

Función Objetivo: Medida de la bondad o eficiencia del fenómeno o problema a desarrollar en términos de las variables involucradas.

Restricciones: Condiciones que definen los valores aceptables o limitantes del problema. Constituyen el modelo del proceso; además describen la interrelación entre las variables.

La solución de un problema de optimización es un conjunto de variables para los cuales la función objetivo tiene un valor óptimo. En términos matemáticos usualmente involucra maximizar o minimizar.

Forma general de un problema de optimización:

Minimizar/Maximizar $f(x)$ Función Objetivo.

Sujeto a:

$h(x) = 0$
 $g(x) \leq 0$ Restricciones.

$x \in R^n$

Donde $f(x)$ es la función objetivo; $h(x) = 0$ es el conjunto de m ecuaciones en n variables x , y $g(x) \leq 0$ es el conjunto de r restricciones de desigualdad. En general, el número de variables n será mucho mayor que el número de ecuaciones m , y la diferencia $(m-n)$ es comúnmente denotado como el número de grados de libertad del problema de optimización.

2.1.2. Requerimientos para la Aplicación de Métodos de Optimización.

Para aplicar los resultados matemáticos y técnicas numéricas de la teoría de optimización para problemas de ingeniería concretos es necesario claramente *delinear los límites del sistema* de ingeniería para optimizarse, *definir el criterio cuantitativo* sobre las bases de que candidato será alineado para determinar el "mejor", *seleccionar el sistema de variables* que será usado para caracterizar o identificar los candidatos, y *definir un modelo* que expresará la manera en que las variables están relacionadas. Esta actividad compuesta constituye el problema de formulación del problema de optimización de ingeniería. Una buena formulación del problema es la clave para el éxito de un estudio de optimización y es en gran grado un arte. Es sabido a través de la práctica que el estudio de aplicaciones acertadas esta basado en el conocimiento de las fortalezas, debilidades y peculiaridades de las técnicas proporcionadas por la teoría de optimización.

Dentro de la formulación del problema de optimización, podemos encontrar o no la presencia de ecuaciones de restricción (o restricciones) esto dependerá de la naturaleza del problema.

2.1.2.1. Restricciones de Igualdad.

Tienen la forma:

$$h(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

Ejemplo:

$$f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 - 16$$

Sujeto a:

$$h(x_1, x_2) : 2x_1 + x_2 = 3$$

Observando la figura 2.1 tenemos que la solución esta restringida a aparecer en la recta.

2.1.2.2. Restricciones de Desigualdad.

Tiene la forma:

$$h(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$$

Ejemplo:

$$f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 - 16$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} h(x_1, x_2) : \\ 2x_1 - x_2 &\geq 0 \\ x_1, x_2 &\geq 0 \end{aligned}$$

La solución para este caso se encuentra en la zona rayada que se observa en la figura 2.2.

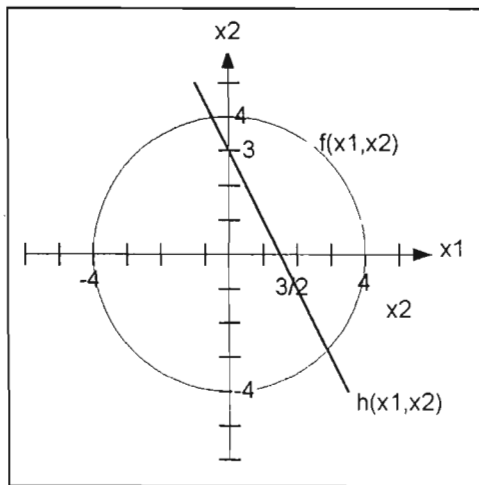


Figura 2.1. Restricciones de igualdad.

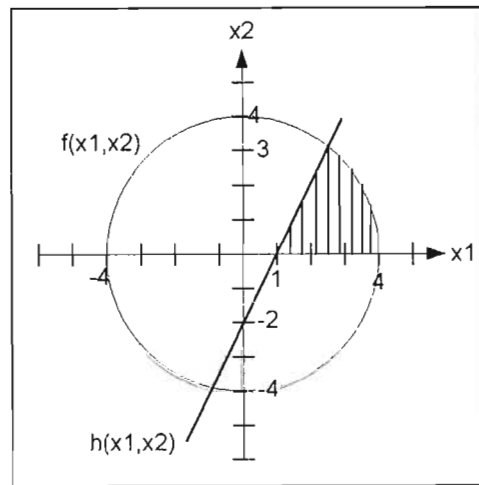


Figura 2.2. Restricciones de Desigualdad.

2.1.2.3. Restricciones Discretas.

Ejemplo:

$$f(x_1, x_2)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} h(x_1, x_2) : \\ x_1 &\geq 0 \\ 5 &\leq x_2 \leq 8 & x_1 > x_2 \end{aligned}$$

$$x_2, x_1 \text{ (Enteros)}$$

De la figura 2.3 tenemos que la solución a este tipo de problema se encuentra en los puntos.

2.1.2.4. Restricciones de Regiones separadas.

Ejemplo:

$$f(x_1, x_2)$$

Sujeto a:

$$h(x_1, x_2) :$$

$$x_1 \geq 0$$

$$x_1 \geq x_2 + 2$$

$$x_2 \geq x_1 + 5$$

Para este caso la solución se encuentra en las regiones separadas indicado por las flechas de la figura 2.4.

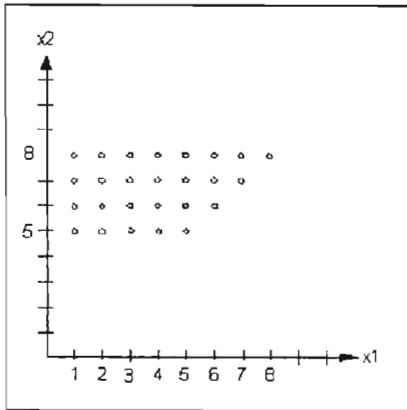


Figura 2.3. Restricciones Discretas.

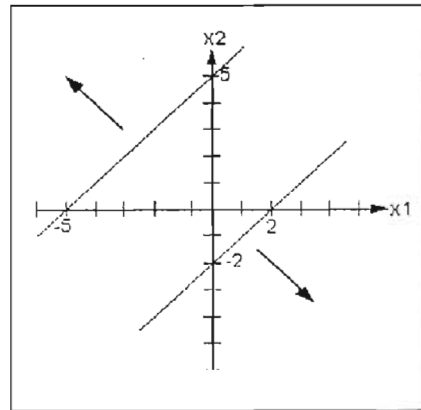


Figura 2.4. Restricciones de Regiones separadas.

Dentro de los problemas de optimización podemos encontrar la solución óptima que cumplen con los requerimientos matemáticos propios del problema, pero existe la posibilidad de que exista otra solución que también cumpla con dichos requerimientos, es decir, puede existir más de un valor óptimo para el problema. Para explicar con mayor detalle esta situación describimos las siguientes definiciones.

2.1.2.5. Optimo Global y Optimo Local.

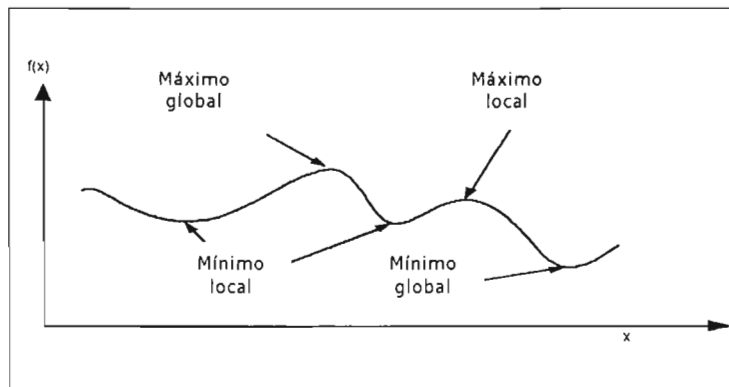


Figura 2.5. Puntos óptimos de una función.

2.1.2.6. Concavidad y Convexidad.

Si se sabe que la función o la región factible (FR) es convexa, se asegura que el mínimo sea global.

Si se sabe que la función o la región factible (FR) es cóncava, se asegura que el máximo sea global.

Definición 1: (Regiones)

La región factible (FR) del problema (P) esta dada por:

$$FR = \{x \mid h(x) = 0, g_i(x) \leq 0, x \in \mathbb{R}^n \} \quad (2.1)$$

La región factible en dos dimensiones involucra tres desigualdades. La región limitante esta dada por aquellos puntos en donde $g_i(x)=0, i=1, 2, 3$.

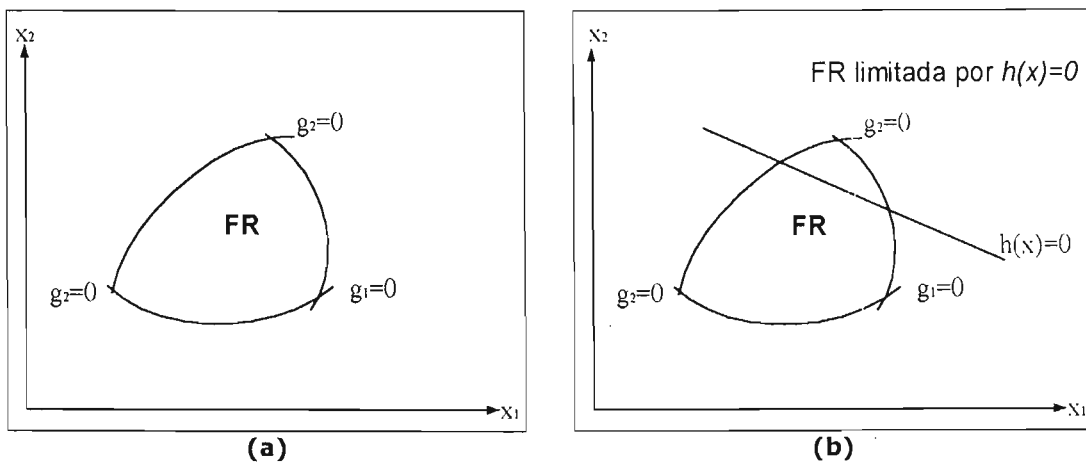


Figura 2.6. (a) Región factible para tres desigualdades; (b) Región factible para tres desigualdades y una ecuación.

Definición 2: (Regiones)

FR es convexa si para cualquier $x_1, x_2 \in FR$:

$$x = \alpha x_1 + (1 - \alpha)x_2 \in FR, \forall \alpha \in [0,1]$$

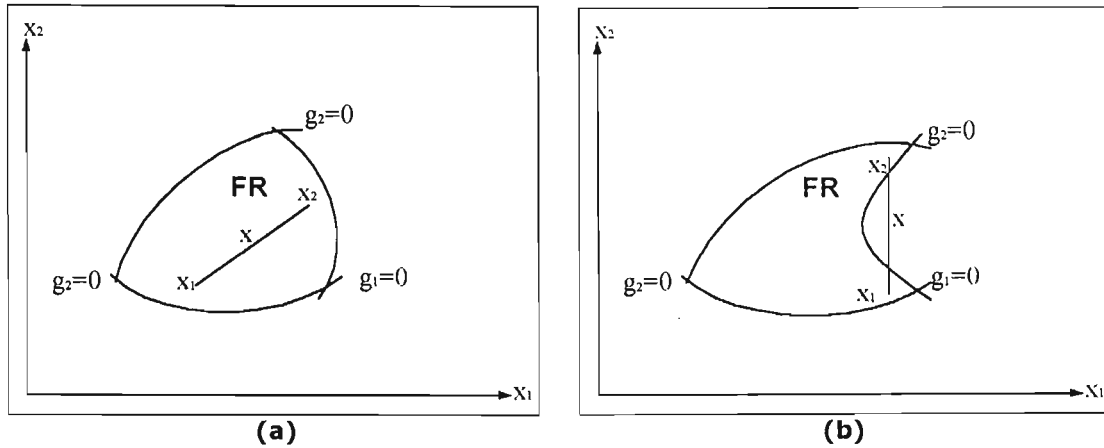


Figura 2.7. (a) Región Factible convexa; (b) Región factible no convexa.

Definición 3: (Funciones)

\$f(x)\$ es convexa si para cualquier \$x_1, x_2 \in R\$:

$$f(\alpha x_1 + [1 - \alpha] x_2) \leq \alpha f(x_1) + (1 - \alpha)f(x_2) \quad \forall \alpha \in [0,1] \tag{2.2}$$

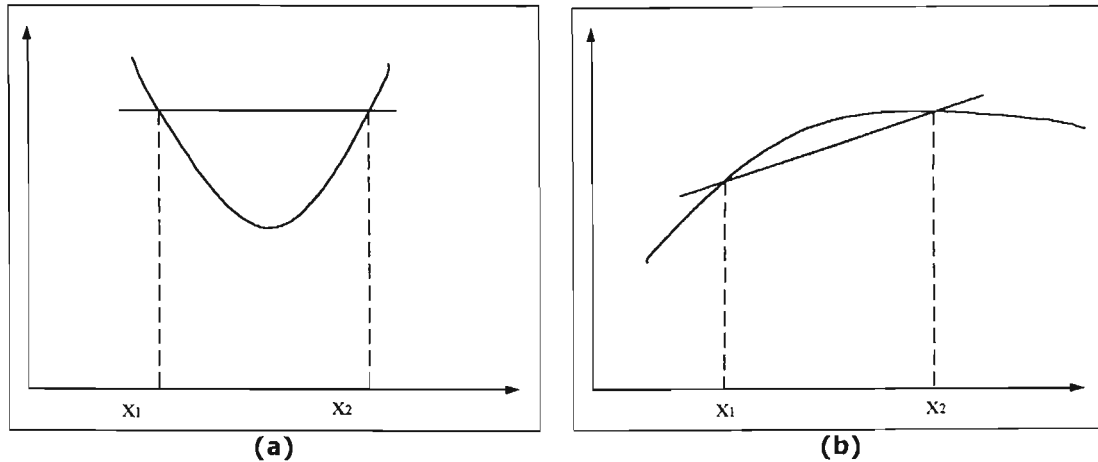


Figura2.8. (a) Función convexa; (b) Función no convexa.

Definición 4: (Funciones)

\$f(x)\$ tiene un mínimo local sí:

$$\hat{x} \in FR \text{ si existe un } \delta > 0, f(x) \geq f(\hat{x}) \text{ para } |x - \hat{x}| < \delta \quad x \in FR. \tag{2.3}$$

Si se cumple estrictamente la desigualdad el local mínimo es un *mínimo local fuerte*, de otra manera es un *mínimo local débil*.

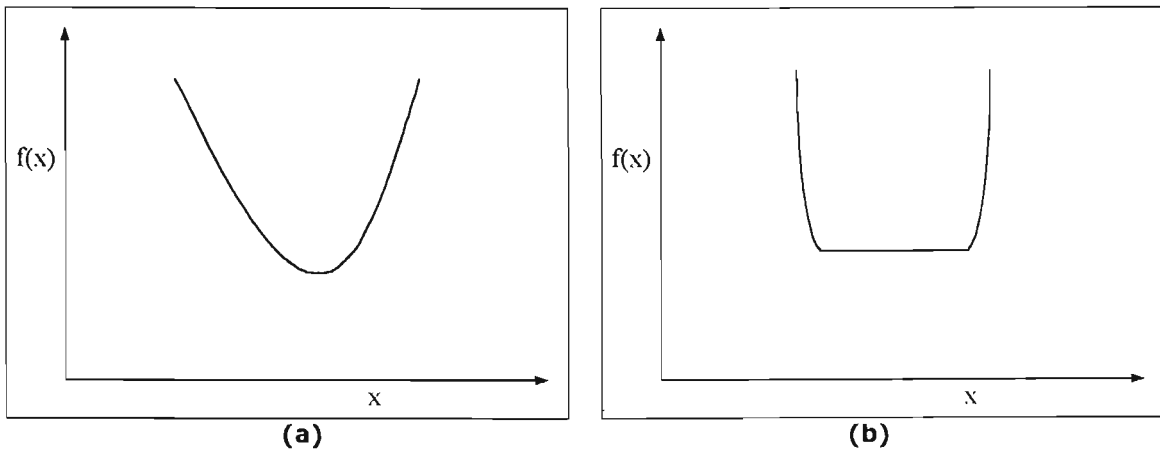


Figura 2.9. (a) Mínimo local Fuerte; (b) Mínimo local débil.

Definición 5: (Funciones)

$f(x)$ tiene un mínimo global en:
 $\hat{x} \in \mathbb{R}$ si $f(x) \geq f(\hat{x})$ para todo $x \in \mathbb{R}$.

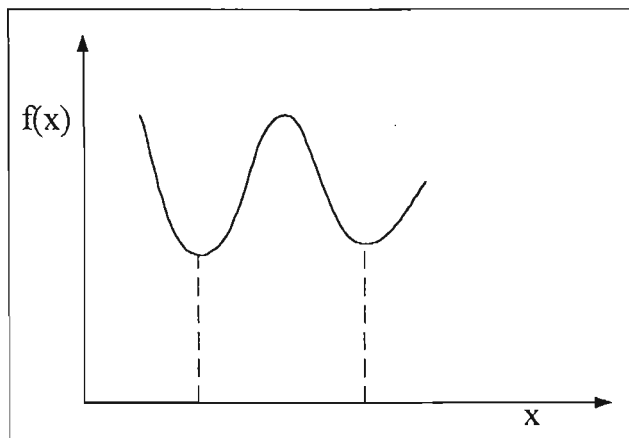


Figura 2.10. Función con dos mínimos locales.

Un mínimo global es un mínimo local, sin embargo lo contrario no es cierto.

2.1.2.7. Función de Lagrange⁽⁸⁾.

Se define como:

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^p \lambda_i h_i(x) \tag{2.4}$$

Notemos que:

$$\nabla_x L(x, \lambda) = 0 \text{ son las restricciones del problema.} \tag{2.5}$$

2.1.2.8. Función Lagrange y Dualidad⁽⁸⁾.

Dado un problema de programación matemática definido en su forma estándar como:

$$\begin{aligned} & \text{Máx } f(x); \\ & \text{S. a. } g_i(x) \geq 0 \quad i = 1, \dots, m. \end{aligned}$$

La función de Lagrange ha sido definida como:

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x), \quad \lambda \geq 0 \tag{2.6}$$

2.1.2.8.1. Punto Silla (Saddle Point).

Diremos que la función $L(x, \lambda)$ tiene un punto de silla en x^0, λ^0 si se cumple que:

$$L(x, \lambda^0) \leq L(x^0, \lambda^0) \leq L(x^0, \lambda) \tag{2.7}$$

$$\text{para } x, \lambda \text{ donde } \lambda_i \geq 0, \quad i = 1 \dots m \tag{2.8}$$

Estudiando detenidamente la expresión (2.7) podemos definir dos funciones las cuales se presentan a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Función Principal } L_*(x) &= \min_{\lambda \geq 0} L(x, \lambda) \end{aligned} \tag{2.9}$$

$$\text{Función Dual } L^*(\lambda) = \max_x L(x, \lambda) \tag{2.10}$$

Para clarificar ideas se representa geoméricamente en la Fig. 2.11 a la superficie $L(x, \lambda)$ y las funciones principales $L_*(x)$ y Dual $L^*(\lambda)$ definidas anteriormente.

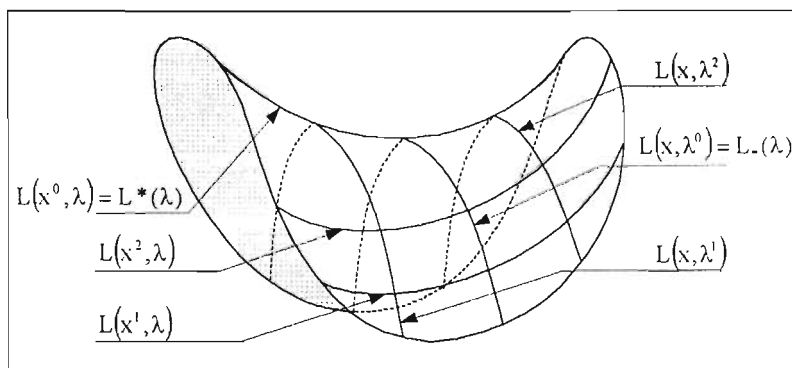


Figura 2.11. Superficie $L(x, \lambda)$.

Por otra parte es importante subrayar que se puede definir dos problemas matemáticos de la forma siguiente:

Problema principal

$$\text{Encontrar } x^0 \text{ tal que } L_*(x^0) = \max_x L_*(x) \quad (2.11)$$

Problema dual

$$\text{Encontrar } \lambda^0 \text{ tal que } L^*(\lambda^0) = \min_{\lambda \geq 0} L^*(\lambda) \quad (2.12)$$

Es importante destacar que:

$$L^*(\lambda^0) = L_*(x^0) \text{ implica que } x^0, \lambda^0 \text{ es un punto de silla de } L(x, \lambda). \quad (2.13)$$

A continuación se presenta geoméricamente en la Fig. 2.12 el punto de silla utilizando la superficie $L(x, \lambda)$.

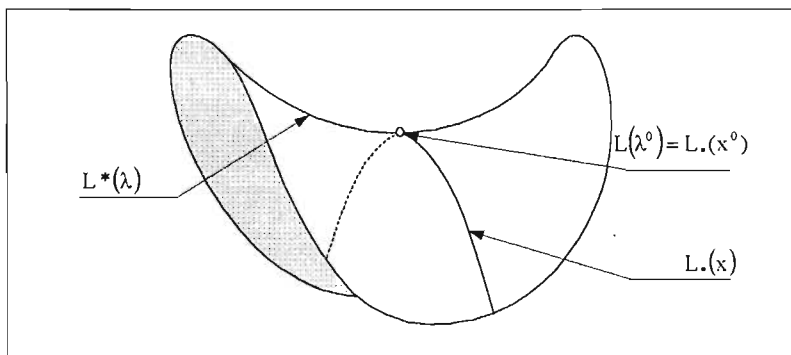


Figura 2.12. Punto de Silla de Caballo.

Problema principal.

Encontrar x^0 tal que:

$$L_*(x^0) = \max_x L_*(x) \quad (2.14)$$

$$\text{Pero } L_*(x) = \min_{\lambda \geq 0} L(x, \lambda)$$

$$= \min_{\lambda \geq 0} \left\{ f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) \right\} \quad (2.15)$$

Supongamos los $g_i(x) < 0$, para $i = 1 \dots m$, entonces la expresión en el corchete de (2.15) tiende a $-\infty$ porque estamos minimizando a lo largo de λ y entonces $\lambda_i = +\infty$ que implica que $L_*(x)$ tiende a $-\infty$ lo cual implica a su vez que el problema no es acotado.

Supondremos por otra parte que los $g_i(x) \geq 0$, $i = 1 \dots m$ entonces x es factible y $L_*(x)$ es igual a $f(x)$ por que el valor mínimo de $\left\{ f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) \right\}$ se obtiene cuando $\lambda_i g_i(x) = 0$, $i = 1 \dots m$.

Entonces vemos que el problema principal es:

$$\text{Máx}_x \quad L_*(x) = f(x) \tag{2.16}$$

$$\text{S. a. } g_i(x) \geq 0 \quad i = 1 \dots m.$$

2.1.3. Condiciones de Optimalidad.

2.1.3.1. Minimización no Restringida.

Considerar primero el problema de optimización no restringido,

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ x \in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

donde $f(x)$ es una función diferenciable continua.

Las *condiciones de primer orden*, que son necesarias para un mínimo local en \hat{x} , son dadas mediante un punto estacionario, que es, un valor \hat{x} que satisface $\nabla f(\hat{x}) = 0$. Esto implica la solución del siguiente sistema de m ecuaciones con n variables desconocidas.

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial x_2} = 0, \dots, \quad \frac{\partial f}{\partial x_n} = 0 \tag{2.17}$$

Las *condiciones de segundo orden* para un mínimo local fuerte, que son condiciones suficientes, requieren que la matriz Hessiana (H) de la segunda derivada parcial sea definida positiva.

Para dos dimensiones la matriz H esta dada por:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Note que esta matriz es simétrica.

La matriz H se dice que es definida positiva si y solo si $\Delta x^T H \Delta x > 0, \forall \Delta x \neq 0$. Las siguientes dos propiedades son útiles para establecer en la práctica la matriz Hesiana positiva exacta:

1. H es definida positiva si los eigenvalores $\rho_i > 0, i = 1, 2, \dots, n$.
2. Si H es definida positiva, entonces $f(x)$ es estrictamente convexa.

Esto es, de la propiedad (1) podemos establecer la exacta positiva si los eigenvalores calculados de la matriz H son todos estrictamente positivos. La propiedad (2) simplemente expresa que las funciones cuya matriz Hesiana es definida positiva son estrictamente funciones convexas. Por lo tanto, analizando la matriz Hesiana de una función es una forma para determinar si una función dada es convexa.

El teorema siguiente es una condición suficiente, útil para la singularidad de un mínimo local en un problema de optimización no restringido.

Teorema 1:

Si $f(x)$ es estrictamente convexa y diferenciable, entonces existe un punto estacionario en \hat{x} , este corresponderá a un mínimo local único.

2.1.3.2. Minimización con Igualdades.

Considere el siguiente problema de optimización restringido con igualdades únicamente:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar : } f(x) \\ &\text{Sujeto a :} \\ &\quad h(x) = 0 \\ &\quad x \in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

En este caso, las condiciones necesarias para un mínimo local restringido son dadas por el punto estacionario de la función Lagrangiana.

$$L = f(x) + \sum_{j=0}^m \lambda_j h_j(x) \quad (2.19)$$

Donde λ_j son los multiplicadores de Lagrange. Las condiciones estacionarias están dadas por,

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \nabla f(x) + \sum_{j=1}^m \lambda_j \nabla h_j(x) = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_j} = h_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2.21)$$

Note que (2.20) y (2.21) definen un sistema de $n + m$ ecuaciones en $n + m$ variables desconocidas (x, λ) . También note que la ecuación (2.20) implica que los gradientes de la función objetivo y las igualdades deben ser linealmente dependientes, mientras que la ecuación (2.21) implica la factibilidad de las igualdades.

Las condiciones suficientes de segundo orden para un mínimo local fuerte son satisfechas cuando la matriz Hessiana de la Lagrangiana es definida positiva.

2.1.3.3. Minimización con Igualdades y Desigualdades.

Considere el problema de optimización restringido con igualdades y desigualdades:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar : } f(x) \\ &\text{sujeta a :} \\ &\quad h(x) = 0 \\ &\quad g(x) \leq 0 \\ &\quad x \in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

En este caso las condiciones necesarias para un mínimo local en \hat{x} están dadas por las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker:

1. Dependencia lineal de gradientes.

$$\nabla f(x) + \sum_{j=0}^m \lambda_j \nabla h_j(x) + \sum_{j=0}^r \mu_j \nabla g_j(x) = 0 \quad (2.22)$$

2. Factibilidad de restricciones.

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, r \quad (2.23)$$

3. Condiciones complementarias.

$$\mu_j g_j(x) = 0, \quad \mu_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, r \quad (2.24)$$

Donde μ_j son los multiplicadores de Kuhn-Tucker correspondientes a las desigualdades, y que son restringidas para no ser negativas. Note que las condiciones complementarias en (3) implican un valor cero para los multiplicadores de las desigualdades inactivas (Ej., $g_j(x) < 0$), y en general un valor diferente de cero para las desigualdades activas (Ej., $g_j(x) = 0$). La figura 2.13 muestra una representación geométrica de un punto que satisface las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker. Note que ∇f esta dado por una combinación lineal de los gradientes de las restricciones activas $\nabla g_1, \nabla g_2$.

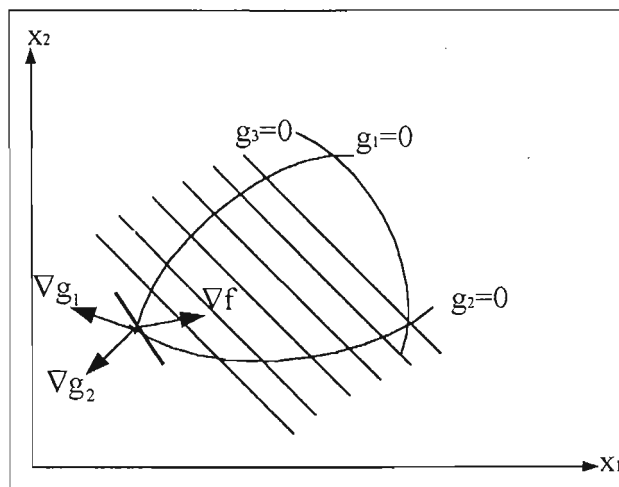


Figura 2.13. Representación geométrica de un punto que satisface las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker.

También puede mostrarse que los multiplicadores μ_j están dados por

$$\mu_j = - \left(\frac{\partial f}{\partial g_j} \right)_{\delta_{g_i=0, i \neq j}} \quad (2.25)$$

En otras palabras, representan la disminución del objetivo mediante un aumento en la función de restricción; o alternativamente, el incremento del objetivo mediante una disminución en la función de restricción. Por último,

sigue que las igualdades activas deben mostrar un valor no negativo de los multiplicadores.

El teorema siguiente es una condición suficiente, útil sobre la singularidad de un óptimo local en problemas de optimización restringida.

Teorema 2.

Si $f(x)$ es convexa y la región factible FR es convexa, entonces existe un mínimo local en x^* ,

- I. Es un mínimo global.
- II. Las condiciones Karush-Kuhn-Tucker son necesarias y suficientes.

La dificultad con las ecuaciones en (1), (2) y (3) para las condiciones de optimalidad del problema es que no pueden ser resueltas directamente como es el caso donde solamente presentan igualdades. En general la solución para estas ecuaciones se lleva a cabo mediante métodos iterativos o numéricos.

2.1.4. Métodos de Optimización.

Hasta ahora se han definido los conceptos básicos utilizados en problemas de optimización.

En esta sección presentaremos una breve apreciación global de los diferentes métodos tradicionales que son usados para resolver los diferentes problemas de optimización. Sin embargo no se presenta a detalle las características de cada método, por otra parte se hace énfasis en los tipos de función objetivo y restricciones usados en cada método con el fin de observar sus diferencias.

2.1.4.1. Programación Lineal.

Cuando únicamente se involucran funciones lineales y las variables continuas x están restringidas a valores no negativos, esto da lugar al problema de programación lineal (PL):

$$\min Z = c^T x \quad (PL)$$

$$\text{Sujeto a. } Ax \leq a \quad x \geq 0$$

Puesto que las funciones lineales son convexas, de la *Propiedad 1* y el *Teorema 2*, la PL tiene un mínimo único. Éste puede, sin embargo, ser un mínimo débil, para el cual los valores variables alternos pueden dar lugar al mismo valor mínimo de la función objetivo.

El método de solución estándar es el algoritmo Simplex (Hillier y Lieberman⁽²⁷⁾, 1986) que aprovecha el hecho de que en una PL el óptimo está en un vértice de la región factible (ver Figura 2.14). En este óptimo, las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker se satisfacen.

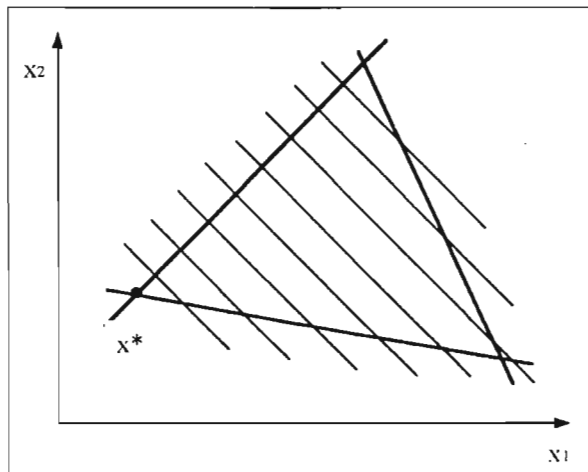


Figura 2.14. Optimo en el vértice x^* para el problema de PL.

Se han desarrollado muchos refinamientos en las últimas tres décadas para el método Simplex, y la mayoría de los códigos de computadora comerciales actuales (Ej. OSL, CPLEX, LINDO) se basan en éste método.

2.1.4.2. Programación Lineal Mixta Entera.

Esta es una extensión del problema de PL en la que las variables continuas son restringidas a valores no negativos y un subconjunto de variables son restringidas a valores enteros (la mayoría comúnmente a 0, 1). La forma general del problema PLEM está dada por.

$$\text{Minimizar : } Z = a^T y + c^T x \quad (\text{PLEM})$$

Sujeta a

$$\begin{aligned} B y + A x &\leq b \\ x &\geq 0 && x \in \mathbb{R}^n \\ y &\in \{0, 1\}^t \end{aligned}$$

Donde y corresponde a un vector de t variables binarias.

El problema de PLEM es muy útil para modelar un número de decisiones discretas con las variables binarias y . Los ejemplos típicos son los siguientes:

1. Múltiple selección de restricciones.

Seleccionar solo un elemento: $\sum_{j=1}^t y_j = 1$

Seleccionar más de un elemento: $\sum_{j=1}^t y_j \leq 1$

Seleccionar al menos un elemento: $\sum_{j=1}^t y_j \geq 1$

2. Implicación de restricciones.

Si el elemento k es seleccionado, el elemento j debe ser seleccionado, pero no viceversa:

$$y_k - y_j \leq 0$$

Si una variable binaria y es cero, una variable continua asociada x debe ser también cero:

$$x - Uy \leq 0, x \geq 0$$

Donde U es un limite superior a x .

3. Restricción cualquiera (restricción disyuntiva)

Cualquier restricción $g_1(x) - Uy \leq 0$ $g_2(x) - U(1 - y) \leq 0$

Donde U es un valor grande.

En general, un valor no entero no puede simplemente redondearse de las variables binarias en la solución relajada LP al punto entero más cercano. Primeramente, porque el redondeo puede ser no factible (ver Figura 2.15 a), o segundo porque no puede ser optimo (ver Figura 2.15 b).

El método estándar para resolver problemas de PLEM es el método de *rama y límite* (Branch and Bound) (Nemhauser y Wolsey⁽⁴⁴⁾, 1988). Para la PLME, empezamos por resolver el problema relajado de LP. Si los valores enteros son obtenidos mediante las variables binarias, detenerse, debido a que tenemos resuelto el problema. Si, por otro lado, ningún valor entero se obtiene, la idea básica es entonces examinar a través del uso de límites un subconjunto de nodos en un árbol binario para localizar la solución global entera mixta. En el árbol, las variables binarias son consecuentemente restringidas una por una a valores 0 - 1 en cada nodo donde la PL correspondiente esta resuelta.

Esto puede ser hecho muy eficientemente mediante la actualización de la PL sucesiva a través de pocas iteraciones simples duales.

Los nodos con soluciones no enteras proporcionan un límite inferior, y nodos con soluciones factibles enteras mixtas proporcionan un límite superior. Los nodos anteriores están comprendidos por dondequiera que el límite inferior sea mas grande o igual que el mejor límite superior actual. Para la numeración del árbol uno tiene que considerar reglas de rama para decidir que variable binaria siguiente es estable en el árbol. Estas reglas alcanzan absolutamente el primer valor diferente de cero para el uso de penalidades para estimar que números binarios producen la más pequeña degradación en la PL.

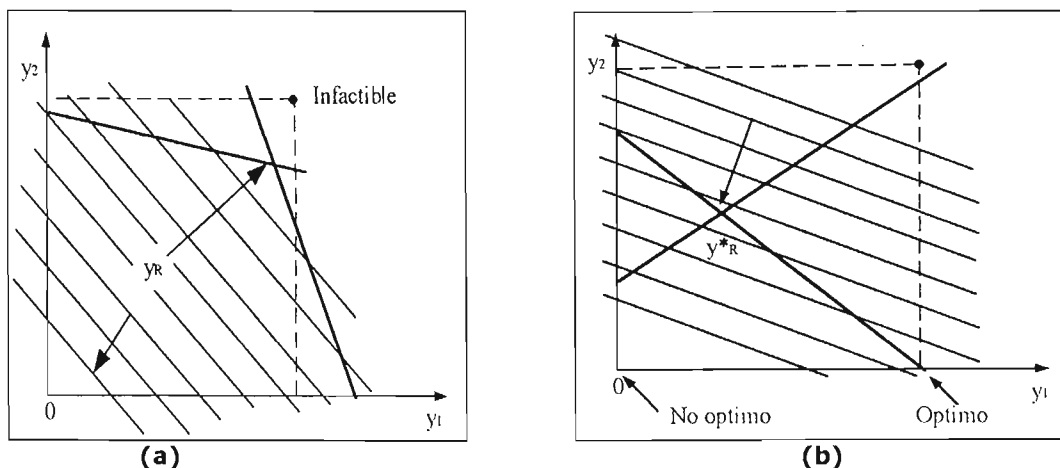


Figura 2.15. (a) Redondeo infactible de la solución entera relajada; (b) Redondeo no óptimo de solución entera relajada.

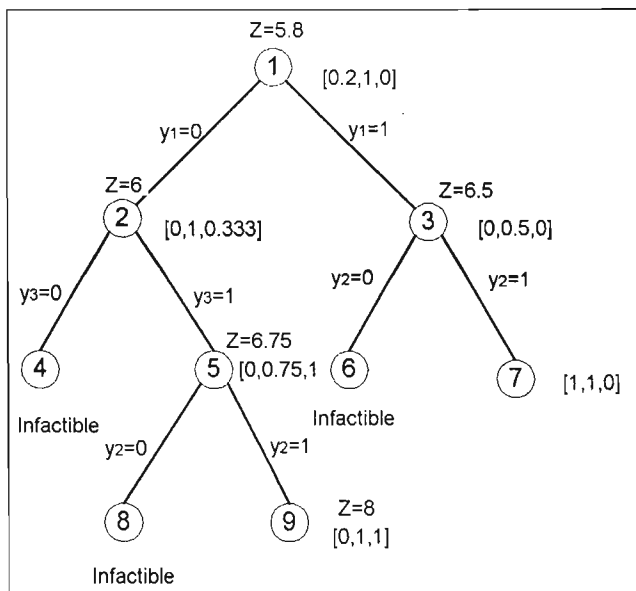


Figura 2.16. Árbol de ramas y límites para el problema ejemplo (PLEM).

Los paquetes de PLME más avanzados permiten al usuario especializado especificar la opción de búsqueda que es usada. La Figura 2.16 presenta un ejemplo de una búsqueda de árbol con ramas y límites en el problema PLME.

Los paquetes para computadora, mas código PL, incluyen extensiones para resolver problemas PLEM (Ej. OSL, CPLEX, LINDO, ZOOM)

2.1.4.3. Programación no Lineal.

En este caso el problema corresponde a:

$$\begin{array}{ll} \text{Minimizar :} & f(x) \\ \text{Sujeto a.} & h(x) = 0 \\ & g(x) \leq 0 \\ & x \in \mathbb{R}^n \end{array} \quad (\text{PNL})$$

Donde en general $f(x)$, $h(x)$, $g(x)$, son funciones no lineales.

Los métodos más eficientes de PNL resuelven este problema mediante la determinación directa de un punto que satisfaga las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker. Como se señaló en el Teorema 2, las soluciones mínimas globales pueden garantizarse para el caso donde el objetivo y restricciones son funciones convexas no lineales, y las igualdades son lineales. Puesto que las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker involucran gradientes de la función objetivo y restricciones, estas deben proporcionarse por el usuario o en forma analítica o mediante el uso de perturbaciones numéricas. Sin embargo, la última opción es costosa para problemas con gran número de variables.

Actualmente los dos mejores métodos para PNL son los algoritmos de programación cuadrática sucesiva (SQP) (Han⁽²⁶⁾, 1976; Powell⁽⁴⁶⁾, 1978) y el método de gradiente reducido (Murtagh y Saunders^(41, 42), 1978, 1982).

Entre software relacionado con este tipo de optimización encontramos GINOS, MINOS, SQP.

2.1.4.4. Programación no Lineal Entera Mixta.

Los problemas de PNLEM normalmente son los más difíciles a menos que una estructura especial pueda aprovecharse. La formulación particular siguiente, que es lineal en las variables 0-1 y lineal / no lineal en las variables continuas será considerada la estructura que se presenta a continuación que es característica de este tipo de problemas.

Minimizar / Maximizar : $Z = c^T y + f(x)$

Sujeto a : $h(x) = 0$

$g(x) \leq 0$

$Ax = a$

$By + Cy \leq d$

$Ey \leq e$

$e \in X = \{x \mid x \in \mathbb{R}^n, x^l \leq x \leq x^u\}$

$y \in \{0,1\}^t$

El problema de programación no lineal mixta entera puede en principio resolverse con el método de rama y límite presentado anteriormente. La diferencia principal aquí es que la inspección de cada nodo requiere la solución de un programa no lineal en lugar de la solución de un PL. Con tal que cada solución del subproblema de PNL sea única. Las características similares como en el caso de PLEM sostendrían con la cual puede garantizarse la solución global rigurosa de la PNLEM.

Es decir la solución de problemas de programación no lineal entera mixta se obtiene mediante la combinación de los métodos Branch and Bound, PNL y PLME.

El algoritmo utilizado en este tipo de problemas es el AO/ER() (Outer Approximation with Equality Relaxation).

La idea básica en el algoritmo OA/ER es resolver una secuencia alterna de problemas patrones de PNL y PLEM.

La implementación computacional de este algoritmo se encuentra en DICOPT++/GAMS.

2.2. Algoritmos Genéticos.

2.2.1. Introducción.

2.2.1.1. Antecedentes.

“AUNQUE el ingenio humano puede lograr infinidad de inventos, nunca ideará ninguno mejor, más sencillo y directo que los que hace la naturaleza, ya que en sus inventos no falta nada y nada es superfluo”, escribió Leonardo Da Vinci (*Cuaderno de Notas, la vida y estructura de las cosas, el embrión*). Un siglo después, Johannes Goldschmidth, mejor conocido por su nombre latino *Fabricius ab Aquapendente* (quien se disputara con Galileo el descubrimiento

de los defectos solares), afirmaría, anticipándose a Darwin: "La naturaleza perpetúa aquello que resulta mejor." (*De Motu Locali Animalium*). Todos los seres vivos que habitamos en este planeta somos, de alguna manera, obras casi perfectas.

La naturaleza (o Dios, como prefiere Leibniz) genera seres óptimos, seres perfectamente adaptados a su entorno, constituido por una infinidad de circunstancias: temperatura, presión atmosférica, precipitación, velocidad del viento, altitud, nivel de insolación, depredadores, alimentos, etc. Lo que vemos hoy en día es el resultado acumulado de miles de experimentos exitosos que han ido refinando paulatinamente alguna creación primigenia. Los experimentos fallidos, probablemente algunos órdenes de magnitud más numerosos que los exitosos, no los vemos. Los individuos resultantes perecieron compitiendo al lado de otros más aptos para sobrevivir. "La selección natural obra solamente mediante la conservación y acumulación de pequeñas modificaciones heredadas, provechosas todas al ser conservado.", escribió Darwin y dio nombre a este proceso (*El origen de las especies, selección natural*).

Estas "modificaciones heredadas", señaladas por Darwin como las generadoras de organismos mejores, son llamadas mutaciones hoy en día y constituyen el motor de la evolución.

Esta cualidad del proceso natural de la evolución (generar organismos óptimos sobre los que influyen infinidad de variables), llamó la atención de algunos científicos en las décadas de los cincuenta y sesenta. Un alemán, de apellido Rechenberg, introdujo en 1965 lo que denominó "*evolutions strategie*", o estrategias evolutivas, como un método para optimizar funciones de varias variables que definían dispositivos tales como perfiles de alas de avión. En 1966 los investigadores Fogel, Owens y Walsh se dieron a la tarea de dejar evolucionar máquinas de estados finitos sometiendo sus diagramas de transición a cambios aleatorios (mutaciones), creando con ello lo que se conoce como *programación evolutiva*. También en los sesenta, John Holland⁽²⁸⁾, junto con algunos de sus colegas y alumnos de la Universidad de Michigan, desarrolló lo que se conoce como *algoritmos genéticos (AGs)*. Sin embargo, el objetivo de Holland no era inventar un método de optimización basado en los mecanismos de la evolución natural, sino elaborar un estudio formal acerca del fenómeno de adaptación en sistemas naturales y artificiales, es decir, definir un modelo para la adaptación. El algoritmo genético definido por Holland en su trabajo⁽²⁴⁾ es un intento de abstraer las características esenciales del proceso evolutivo tal como se observa en la naturaleza, con vistas a importarlo a sistemas de cómputo.

En la actualidad, los AGs son preferentemente utilizados como métodos de búsqueda de soluciones óptimas que simulan la evolución natural y han sido usados con éxito en la solución de problemas de optimización combinatoria,

optimización de funciones reales y como mecanismos de aprendizaje de máquina (*machine learning*). Esto último les ha ganado un lugar en el campo de la inteligencia artificial.

2.2.1.2. Algoritmos Genéticos.

Una definición bastante completa de un algoritmo genético es la propuesta por John Koza⁽³⁷⁾:

“Es un algoritmo matemático altamente paralelo que transforma un conjunto de objetos matemáticos individuales con respecto al tiempo usando operaciones modeladas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto, y tras haberse presentado de forma natural una serie de operaciones genéticas de entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres (letras o números) de longitud fija que se ajusta al modelo de las cadenas de cromosomas, y se les asocia con una cierta función matemática que refleja su aptitud”.

La analogía entre los Algoritmos Genéticos y el sistema natural se muestra a través de la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Analogía entre los AGs y el sistema natural

Naturaleza	Algoritmos Genéticos
Cromosoma	Palabra binaria, vector, etc
Gen	Característica del problema
Genotipo	Estructura
Fenotipo	Estructura sometida al problema
Individuo	Solución
Generación	Ciclo

A continuación se procurara aclarar la manera como los algoritmos genéticos simulan el proceso de evolución natural.

2.2.1.2.1. Codificación del dominio

Para un algoritmo genético lo primero que se requiere es determinar en qué espacio se encuentran las posibles soluciones al problema que se pretende resolver. En caso de tener un problema de optimización de una función cuyo dominio es un subconjunto de los números reales, entonces este subconjunto es al que nos referimos. Pero el algoritmo opera sobre “códigos genéticos”, sobre genotipos que se deberán mapear al espacio de soluciones. Es decir, es necesario *codificar* de alguna manera el dominio del problema para obtener estructuras manejables que puedan ser manipuladas por el AG. Cada una de estas estructuras constituye el equivalente al genotipo de un individuo en

términos biológicos. El elemento del dominio del problema al que se mapea este genotipo es el análogo al fenotipo. Es frecuente que el código de los elementos del dominio del problema utilice un alfabeto binario (0's y 1's).

Una vez que se ha definido la manera de codificar los elementos del dominio del problema y se conoce la forma de pasar de un elemento a su código y viceversa, es necesario fijar un punto de partida. Los algoritmos genéticos manipulan conjuntos de códigos en generaciones sucesivas. Nuevamente haciendo una analogía, manipulan poblaciones de códigos. En éstas un código puede aparecer más de una vez. El algoritmo se encargará de favorecer la aparición en la población de códigos que correspondan a elementos del dominio que estén próximos a resolver el problema. En resumen, el algoritmo recibirá como entrada una población de códigos y a partir de ésta generará nuevas poblaciones, donde algunos códigos desaparecerán mientras que otros, que se mapean en mejores soluciones posibles, aparecen con más frecuencia hasta que se encuentra una satisfactoria o hasta que se cumple alguna otra condición de terminación. A lo largo del texto, los códigos en una población, es decir, los elementos de ésta serán llamados *individuos* y a los códigos en general, ya no en el contexto exclusivo de una población, se les denominará indistintamente *cromosomas*, *genotipo*, *genoma* o *código genético*, por analogía con los términos biológicos de donde surgen.

2.2.1.2.2. Evaluación de la población.

Para determinar cuáles de estos individuos corresponden a buenas propuestas de solución y cuáles no, es necesario calificarlos de alguna manera. Cada individuo de cada generación de un algoritmo genético recibe una *calificación* o, para usar el término biológico, una medida de su *grado de adaptación* (*fitness*). Éste es un número real no negativo tanto más grande cuanto mejor sea la solución propuesta por dicho individuo. El objetivo de este número es que permita distinguir propuestas de solución buenas de aquéllas que no lo son. Si el problema a resolver consiste en maximizar una función, entonces la calificación asignada a un individuo determinado debe indicar qué tan alto es el valor de la función en el elemento de su dominio codificado por el individuo. Si, **en cambio, el problema es determinar la ruta más corta entre dos puntos**, la calificación deberá ser tanto más alta cuanto más corto sea el camino codificado en el individuo que esté siendo calificado.

Evidentemente, al hablar de que a cada individuo de la población se le asigna una y sólo una calificación, se está hablando de una función que se denomina *función de adaptación*, cuya evaluación puede no ser sencilla y es, de hecho, lo que en la mayoría de los casos consume más tiempo en la ejecución de un algoritmo genético. Hay que tener en cuenta que se evalúa una vez en cada individuo de cada generación. Si un AG es ejecutado con una población de tamaño 100 durante 100 generaciones, la función es evaluada 10,000 veces. Además, puede darse el caso de que la función de evaluación no tenga una

regla de correspondencia explícita, esto es, una expresión algebraica, y puede ocurrir incluso que la función cambie de generación en generación.

2.2.1.2.3. Selección.

Una vez calificados todos los individuos de una generación, el algoritmo debe, al igual que lo hacen la naturaleza y el hombre, seleccionar a los individuos más calificados, mejor adaptados al medio, para que tengan mayor oportunidad de reproducción. De esta forma se incrementa la probabilidad de tener individuos "buenos" (con alta calificación) en el futuro. Si de una determinada generación de individuos se seleccionaran sólo aquellos con una calificación mayor o igual que cierto número c , para pasarlos a la siguiente generación, es claro que en ésta la calificación promedio superará c y por tanto al promedio de la generación anterior. La selección ocasiona que haya más individuos buenos, explota el conocimiento que se ha obtenido hasta el momento, procurando elegir lo mejor que se haya encontrado, elevando así el nivel de adaptación de toda la población. Más adelante se verá qué tan importante es esta explotación.

En principio podría parecer que es conveniente tener una estrategia de selección estricta para que mejore rápidamente la población y converja el algoritmo, es decir, que la población se acumule alrededor de un genotipo óptimo. Esto no es cierto. Lo que ocurrirá es que la población se acumulará rápidamente alrededor de algún individuo que sea bueno, comparativamente con el resto de los individuos considerados a lo largo de la ejecución del algoritmo, pero este individuo puede no ser el mejor posible. A esto se le suele llamar *convergencia prematura*. No se puede asegurar pero sí procurar que lo anterior no ocurra. Además de la explotación es necesario que exista exploración. El AG debe, no sólo seleccionar de entre lo mejor que ha encontrado, sino procurar encontrar mejores individuos. A esto se dedican los operadores que serán descritos a continuación, los que aseguran que en todo momento exista cierto grado de variedad en la población, procurando con ello que no se "vicie".

En la estrategia de selección normalmente se incluye un elemento extra que sirve de "ancla". Si sólo se hace selección forzando que sea más probable elegir al mejor individuo de la población pero sin asegurarlo, es posible que este individuo se pierda y no forme parte de la siguiente generación. Para evitar lo anterior se fuerza la selección de los mejores n individuos de la generación para pasar intactos a la siguiente. A esta estrategia se le denomina *elitismo* y puede ser generalizada especificando que permanezcan en la población los n mejores individuos de las pasadas k generaciones.

2.2.1.2.4. Cruzamiento.

En el contexto de los algoritmos genéticos reproducirse significa que, dados dos individuos seleccionados en función de su grado de adaptación, éstos pasen a formar parte de la siguiente generación o, al menos, mezclen sus códigos genéticos para generar *hijos* que posean un código híbrido. Es decir, los códigos genéticos de los individuos se *crusan*. Existen muchos mecanismos de cruzamiento. En esta sección sólo se presenta uno de ellos pero todos tienen por objeto que el código de un individuo *A* y el de uno *B*, previamente seleccionados, se mezclen, es decir, se fragmenten y recombinen para formar nuevos individuos con la esperanza de que éstos hereden de sus progenitores las características deseables.

2.2.1.2.5. Mutación.

Ocasionalmente algunos elementos del código de ciertos individuos de un algoritmo genético se alteran a propósito. Éstos se seleccionan aleatoriamente en lo que constituye el símil de una *mutación*. El objetivo es generar nuevos individuos, que exploren regiones del dominio del problema que probablemente no se han visitado aún. Esta exploración no presupone conocimiento alguno, no es sesgada. Aleatoriamente se buscan nuevas soluciones posibles que quizá superen las encontradas hasta el momento. Esta es una de las características que hacen aplicables los algoritmos genéticos a gran variedad de problemas: no presuponer conocimiento previo acerca del problema a resolver ni de su dominio, no sólo en la mutación sino en el proceso total. De hecho, el problema a resolver sólo determina la función de evaluación y la manera de codificar las soluciones posibles (la semántica de los códigos genéticos de los individuos). El resto de los subprocesos que constituyen el algoritmo son independientes y universalmente aplicables.

2.2.1.2.6. Parámetros y Criterios de Parada.

En un algoritmo genético varios parámetros controlan el proceso de evolución:

- Tamaño de la Población → número de puntos del espacio de búsqueda siendo considerados en paralelo.
- Tasa de Cruzamiento → probabilidad de un individuo de ser recombinado con otro.
- Tasa de Mutación → probabilidad de que el contenido de cada posición/gen del cromosoma sea alterado.
- Número de Generaciones → número total de ciclos de evolución de un AG.

- Total de Individuos → número total de tentativas (tamaño de la población x número de generaciones)

Los dos últimos parámetros son empleados generalmente como criterio de parada de un algoritmo genético.

Un algoritmo genético puede ser descrito como un proceso continuo que repite ciclos de evolución controlados por un criterio de parada, como se muestra en la figura 2.17.

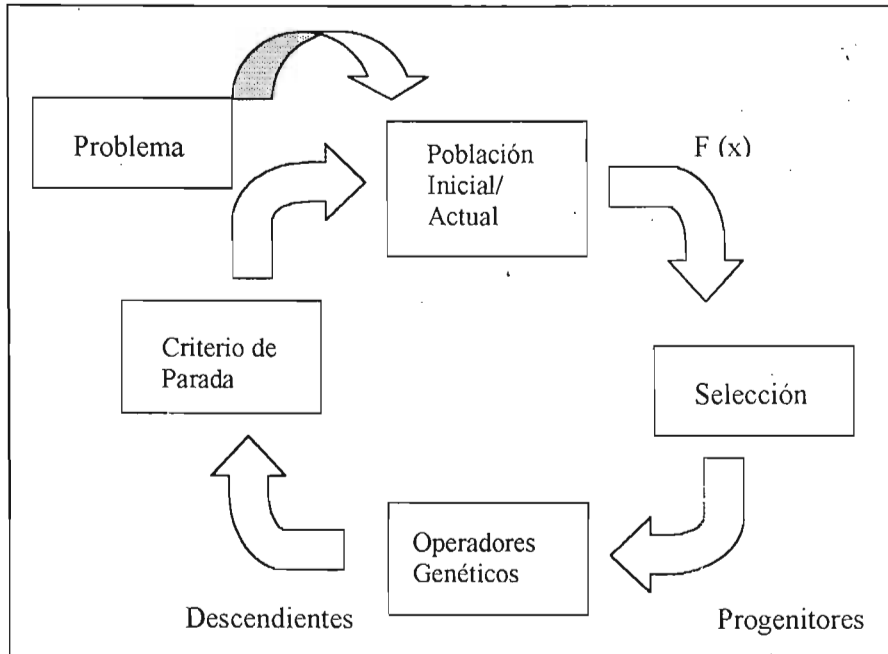


Figura 2.17. Algoritmo Genético descrito como un proceso continuo.

2.2.1.2.7. El Algoritmo Genético Simple (AGS)

En su trabajo, Holland⁽²⁹⁾ propone una manera de seleccionar individuos y de cruzarlos. Actualmente existen muchas otras propuestas, pero las de Holland constituyen aún hoy la base de muchos desarrollos teóricos y prácticos en el área. Goldberg⁽²⁴⁾ retomó el algoritmo de Holland y lo popularizó llamándolo *algoritmo genético simple (AGS)*. En éste se considera que los códigos genéticos están en binario. Explicado con detalle, el proceso de un AGS es:

1. Decidir cómo codificar el dominio del problema.
2. Generar un conjunto aleatorio (población inicial) de N posibles soluciones codificadas al problema. A ésta se le llamará la población actual.
3. Calificar cada posible solución (individuo) de la población actual.

4. Seleccionar dos individuos de la población actual con una probabilidad proporcional a su calificación.
5. Lanzar una moneda al aire (con probabilidad p_c cae cara).
6. Si cayó cara mezclar los códigos de los dos individuos seleccionados para formar dos híbridos, a los que llamaremos nuevos individuos.
7. Si cayó cruz llamamos a los individuos seleccionados nuevos individuos.
8. Por cada bit de cada nuevo individuo lanzar otra moneda al aire (con probabilidad p_m cae cara).
9. Si cae cara cambiar el bit en turno por su complemento.
10. Si cae cruz el bit permanece inalterado.
11. Incluir a los dos nuevos individuos en una nueva población.
12. Si la nueva población tiene ya N individuos, llamarla población actual y regresar al paso 3, a menos que se cumpla alguna condición de terminación.
13. Si no, regresar al paso 4.

En el algoritmo se utiliza el término "lanzar una moneda al aire" para decir un experimento de Bernoulli (aquel en el que pueden ocurrir exclusivamente dos eventos posibles, uno con probabilidad p y otro con probabilidad $1-p$). Es decir, el lanzamiento de una moneda "extraña" en la que no necesariamente ambas caras son equiprobables.

La condición de terminación, a la que se hace referencia en el paso 12, puede definirse de muchas maneras. Se puede fijar un número máximo de generaciones que se pretende ejecutar el algoritmo, o puede decidirse hacer alto cuando la mayoría de la población, digamos el 85%, tenga una calificación que esté dentro de 0.6 desviaciones estándar de la media. En fin, opciones hay muchas. Generalmente depende del problema o de las preferencias personales la decisión acerca de cuándo es conveniente detenerse.

En el paso 4 se menciona que hay que seleccionar dos individuos con probabilidad proporcional a su calificación. Este tipo de selección proporcional es también llamado de "ruleta" (roulette wheel selection) por lo siguiente: supóngase que se suman las calificaciones de todos los individuos de la población y esta suma es considerada el 100% de una circunferencia. Luego, a cada individuo se le asigna el trozo que le corresponde de ésta según su aportación a la suma de las calificaciones. Es decir, si la calificación de un

individuo es x_i ; entonces le corresponde un segmento de circunferencia dado por la simple regla de tres:

$$s = 2\pi \frac{x_i}{\sum_j x_j} \tag{2.26}$$

¿Qué ocurrirá entonces si se considera ésta como una ruleta y se coloca una lengüeta que roce el borde de ella? (figura 2.18). La probabilidad de que dicha lengüeta quede en el arco correspondiente al individuo de calificación x_i , cuando la rueda se detenga tras realizar algunos giros, es:

$$p(i) = \frac{x_i}{\sum_j x_j} \tag{2.27}$$

Lo que es proporcional a la calificación (x_i) del individuo.

Aún queda por aclarar cómo es que se mezclan los códigos de dos individuos para formar dos híbridos. En general hay muchas maneras de hacerlo. Sin embargo, la que se usa en el AGS y una de las más populares, es el cruzamiento de un punto (1-point crossover) ya mencionado. En este tipo de cruzamiento, dados dos individuos se elige aleatoriamente un punto de corte entre dos bits cualesquiera del cromosoma. Esto define segmentos izquierdos y derechos en cada genotipo. Se procede entonces a intercambiar los segmentos derechos (o los izquierdos, indistintamente) de cada individuo. De esto resultan, al igual que en el caso del cruzamiento de cromosomas, dos híbridos (figura 2.19).

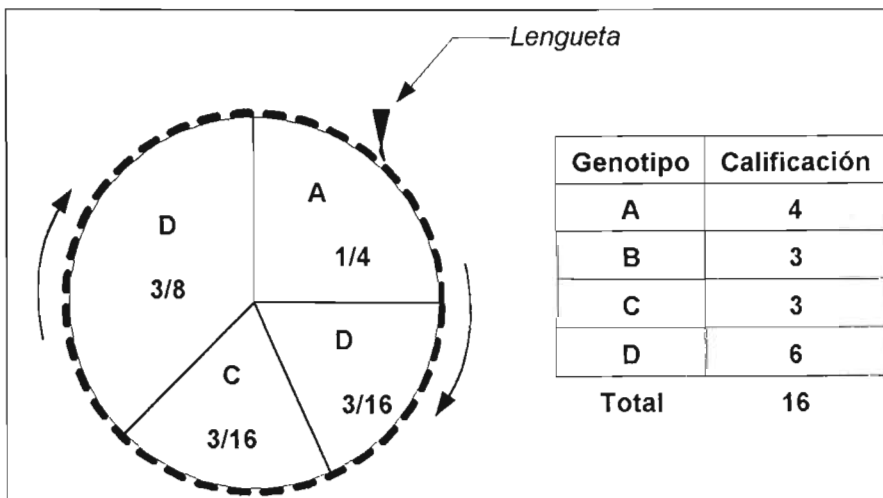


Figura 2.18. Selección proporcional o por ruleta.

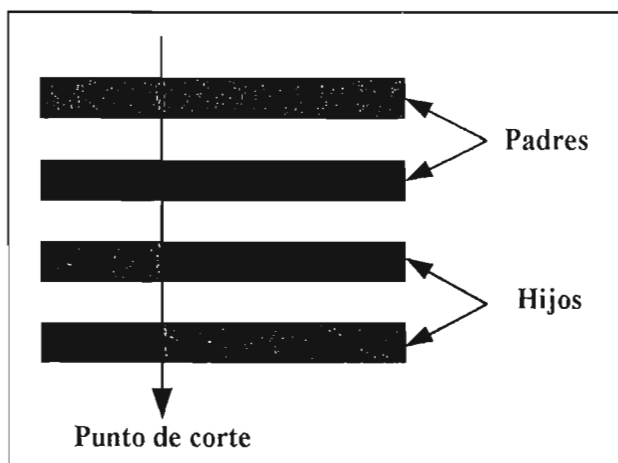


Figura 2.19. Cruzamiento de un punto (1-point crossover).

El algoritmo genético simple se caracteriza por tener:

1. Tamaño de población fijo en todas las generaciones.
2. Selección proporcional (de ruleta).
3. Cruzamiento de un punto. La probabilidad de cruce se mantiene fija para todas las generaciones y todas las parejas.
4. Mutación uniforme (todas las posiciones de las cadenas genéticas tienen la misma probabilidad de ser cambiadas). La probabilidad de mutación permanece fija para todas las generaciones y todas las posiciones de los individuos.
5. Selección no elitista. Esto es, no se copian individuos de una generación a otra sin pasar por el proceso de selección aleatoria (en este caso, proporcional).

2.2.2. Fundamentos Matemáticos

2.2.2.1. Terminología.

2.2.2.1.1. Función de adaptación.

Los algoritmos son mecanismos de búsqueda que operan sobre un conjunto de códigos posiblemente muy grande, pero finito. Del dominio de búsqueda se toman iteradamente conjuntos de muestras y cada elemento de una muestra es calificado dependiendo de qué tan bien cumpla con los requisitos de aquello que es buscado. Luego son seleccionados los elementos, a los que también llamaremos *individuos*, que cumplan mejor con dichos requisitos. Éstos se

multiplican en las siguientes muestras y son sometidos a ciertos operadores que emulan a los que funcionan en la naturaleza.

Uno de los elementos esenciales involucrados en este proceso es la calificación asignada a cada individuo, a la que también llamaremos *grado de adaptación*. Esta calificación es un número mayor o igual a cero, y en conjunto con la selección se convierte en una medida de la posibilidad de reproducción para cada individuo. Esto es, existe una función de adaptación que asocia a cada individuo de la muestra (población) con un número real no negativo. Mientras más grande sea el valor asignado a un individuo dado mayor será la probabilidad de éste de ser seleccionado para formar parte de la siguiente generación de muestras.

2.2.2.1.2. Esquemas.

Se ha creado una notación para los conjuntos de cadenas binarias (cromosomas) mediante cadenas compuestas de tres símbolos, a saber: $\{0,1,*\}$. Considérese un conjunto de cadenas que poseen valores comunes en ciertas posiciones. Para construir la cadena que denota este conjunto, basta colocar en las posiciones donde las cadenas coinciden el valor explícito que tienen, y en las posiciones donde los valores no coinciden se coloca un *. De esta manera por ejemplo, $1*0*$ denota el conjunto $\{1000, 1001, 1100, 1101\}$. A las cadenas compuestas de 1, 0 y * se les denomina *esquemas*.

El número de posiciones con valor explícito de un esquema H se denomina *orden* del esquema y se denota por $O(H)$. La distancia entre la primera y la última posición explícita se denomina *longitud de definición (defining length)* y se denota como $\delta(H)$. En la figura 2.20 A se ilustran esos conceptos:

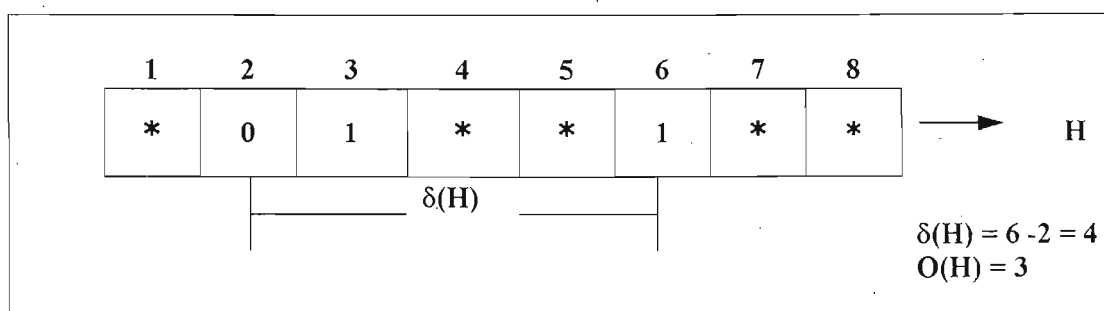


Figura 2.20.A. Orden y longitud de definición de un esquema.

2.2.2.2. El Teorema del Esquema.

Podemos comprender mejor el principio del funcionamiento de los algoritmos genéticos a partir de la Teoría del Esquema (patrones) desarrollada por John Holland⁽²⁸⁾ en 1975 para el AGS, y se caracteriza por utilizar selección

proporcional y cruzamiento de un punto, entre otras cosas. En esta sección se deducirá el teorema procurando ser un poco más general, pues se considerarán tipos de cruzamiento distintos del tradicional.

2.2.2.2.1. Efecto de la Selección.

Supóngase que en la población de tamaño N de generación t de un algoritmo genético existen k representantes del esquema H y que f_1, f_2, \dots, f_k son los valores de la función de adaptación para los k representantes. Si se selecciona de forma aleatoria un miembro de la población usando el mecanismo de la ruleta, la probabilidad de que éste sea el i -ésimo representante del esquema H es:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j}$$

Entonces, la probabilidad de seleccionar algún representante del esquema H es :

$$p_H = \frac{f_1}{\sum_{j=1}^N f_j} + \frac{f_2}{\sum_{j=1}^N f_j} + \frac{f_3}{\sum_{j=1}^N f_j} + \dots + \frac{f_k}{\sum_{j=1}^N f_j} = \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_k}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (2.28.A)$$

Sean $\bar{f}(H)$ el valor de adaptación promedio de los representantes del esquema H y $m(H, t)$ el número de representantes del esquema en la población de generación t (i.e., $m(H, t)=k$). Por definición:

$$\bar{f}(H) = \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_k}{m(H, t)}$$

de donde:

$$f_1 + f_2 + \dots + f_k = \bar{f}(H)m(H, t)$$

sustituyendo en 2.28.A:

$$p_H = m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (2.28.B)$$

esto denota la probabilidad de seleccionar un representante del esquema H en la población de generación t .

Sea \bar{f} el valor promedio de adaptación de la población de generación t

$$\bar{f} = \frac{\sum_{j=1}^N f_j}{N}$$

entonces, si se seleccionan N individuos de la población de generación t para la generación t +1, el valor esperado de individuos seleccionados del esquema H es:

$$m(H, t + sel) = N \cdot m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\sum_{j=1}^N f_j} = m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}}$$

Hay que reiterar que las expresiones presentadas son válidas sólo para el tipo de selección proporcional o de ruleta (no son ciertas en general).

2.2.2.2.2. Efecto del Cruzamiento.

Supóngase ahora que se aplica algún tipo de cruzamiento con cierta probabilidad p_c sobre los individuos previamente seleccionados. Considérese lo que ocurriría con aquellas cadenas pertenecientes a un cierto esquema H. Algunas de estas cadenas se cruzarían con otras de forma tal que la cadena resultante ya no sería representante del esquema H, es decir, el esquema se rompería. Otras no serían seleccionadas para cruzarse y simplemente pasarían intactas a la siguiente generación y habría otras más que originalmente no eran representantes del esquema y que al cruzarse generarían cadenas de H. El valor esperado de cadenas representantes de H que han sido seleccionadas y a las que no se les aplica cruzamiento es:

$$(1 - p_c) m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} \tag{2.28.C}$$

Sea p_r la probabilidad de ruptura del esquema H bajo el tipo de cruzamiento que esté siendo utilizado. El valor esperado del número de cadenas representantes de H que fueron seleccionadas y permanecen en el esquema después de aplicárseles cruzamiento es:

$$p_c \left(m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} (1 - p_r) \right) \tag{2.28.D}$$

A la expresión de la ecuación 2.28.D habría que hacerle una pequeña corrección para considerar aquellas cadenas que originalmente estaban fuera del esquema y que después de cruzarlas generaron representantes de él. Sea g el número de cadenas ganadas por el esquema H mediante el mecanismo descrito, rescribiendo 2.28.D se tiene:

$$p_c \left(m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} (1 - p_r) + g \right) \tag{2.28.E}$$

Resumiendo 2.28.C y 2.28.E, el valor esperado del número de representantes del esquema H tras haber efectuado selección y cruzamiento es:

$$m(H, t + \text{sel} + \text{cru}) = (1 - p_c) m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} + p_c \left(m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} (1 - p_r) + g \right)$$

si excluimos g:

$$m(H, t + \text{sel} + \text{cru}) \geq (1 - p_c) m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} + p_c \left(m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} (1 - p_r) \right)$$

factorizando:

$$m(H, t + \text{sel} + \text{cru}) \geq m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} ((1 - p_c) + p_c (1 - p_r))$$

es decir,

$$m(H, t + \text{sel} + \text{cru}) \geq m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} (1 - p_c p_r) \quad (2.28.F)$$

2.2.2.2.3. Efecto de la Mutación.

Por último, hay que considerar el efecto de las mutaciones. Supóngase que una mutación se aplica con probabilidad p_m y que tiene el efecto de invertir un bit (cambiar un 1 por un 0 ó viceversa). Para que una cadena representante del esquema H permanezca en él tras una mutación, debe ocurrir que ninguno de los bits definidos del esquema sea invertido. Recuérdese que el número de bits definidos del esquema es $O(H)$. La probabilidad de que un bit no sea invertido por una mutación es $1 - p_m$, así que la probabilidad de que ninguno de los bits definidos sea invertido, suponiendo que el invertir cada bit es un evento independiente, es:

$$\mu(p_m) = (1 - p_m)^{O(H)} \quad (2.28.G)$$

Añadiendo 2.28.G a la expresión 2.28.F se tiene:

$$m(H, t + 1) \geq m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} (1 - p_c p_r) (1 - p_m)^{O(H)} \quad (2.28.H)$$

A esta expresión se le conoce como el *teorema del esquema*, y existen diversas versiones de éste, todas ellas equivalentes. Goldberg⁽²⁴⁾, por ejemplo, prefiere desarrollar la expresión 2.28.G en serie de MacLaurin (o bien mediante

el teorema del binomio) para simplificar, dado que, en principio, p_m es un número muy cercano a cero:

$$\mu'(p_m) = \frac{d(1-p_m)^{O(H)-1}}{dp_m} = -O(H)(1-p_m)^{O(H)-1}$$

de donde:

$$\mu(0) = 1 \quad \gamma \quad \mu'(0) = -O(H)$$

por lo tanto:

$$\mu(p_m) = (1-p_m)^{O(H)} \approx 1 - O(H)p_m \quad (2.28.I)$$

Añadiendo 2.28.I a 2.28.F:

$$\begin{aligned} m(H, t+1) &\geq m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} (1 - p_c p_r) (1 - O(H)p_m) \\ &= m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} (1 - p_c p_r - O(H)p_m + O(H)p_m p_c p_r) \\ &\geq m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} (1 - p_c p_r - O(H)p_m) \end{aligned}$$

finalmente Goldberg escribe:

$$m(H, t+1) \geq m(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} (1 - p_c p_r - O(H)p_m) \quad (2.28.J)$$

En otras versiones se encuentra todo dividido por el tamaño de la población, de tal forma que todo queda expresado en términos de probabilidad:

$$p(H, t+1) \geq p(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} (1 - p_c p_r) (1 - p_m)^{O(H)} \quad (2.28.K)$$

o bien:

$$p(H, t+1) \geq p(H, t) \frac{\bar{f}(H)}{\bar{f}} (1 - p_c p_r - O(H)p_m) \quad (2.28.L)$$

2.2.2.2.4. Tipos de cruzamiento.

Como se mencionó, existen diversos tipos de cruzamiento. En las expresiones 2.28H – 2.28L aparece una cierta probabilidad genérica p_r que depende del tipo de cruzamiento que se use y de las características del esquema que se analice. Los cruzamientos más utilizados son tres, a saber:

- a) Cruzamiento de un punto. Se elige un punto de corte y se intercambian los segmentos análogos de las dos cadenas ^{(9), (24), (56)}.
- b) Cruzamiento de dos puntos. Se eligen dos puntos de corte y se intercambian los segmentos medios de ambas cadenas, se considera a los extremos de la cadena como sitios contiguos, i.e., como un anillo ^{(10), (56)}.
- c) Cruzamiento uniforme. Para cada posición de bit de una cadena a generar se elige aleatoriamente el bit de la misma posición de alguna de las cadenas generadoras ^{(10), (54), (56)}.

Cada uno de estos tipos está ilustrado en la figura 2.20 B. A continuación se determinará cuál debe ser la expresión para p_r en cada caso. En lo que sigue, l representará la longitud total de las cadenas de bits ($l > 1$). Recuérdese que $O(H)$ denota el número de bits explícitos (fijos) de un esquema y que $\delta(H)$ denota la distancia entre el primero y el último lugar fijos de un esquema.

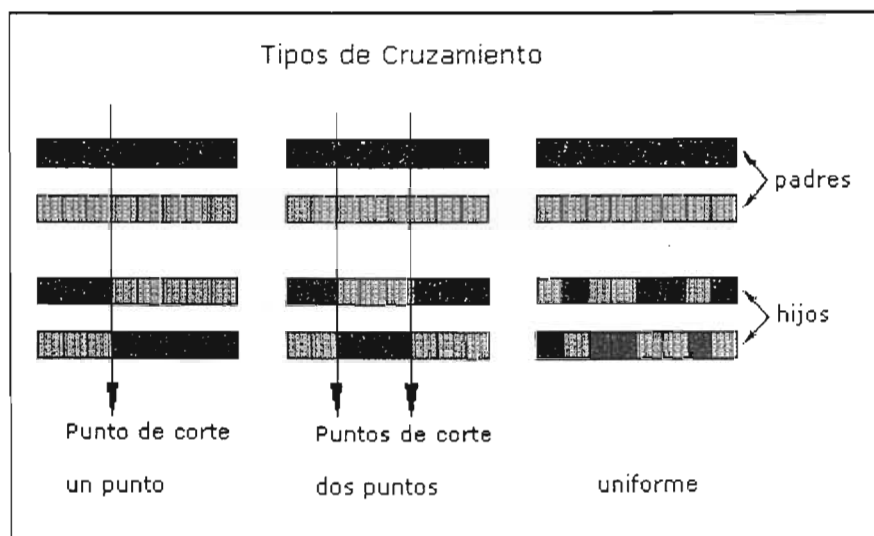


Figura 2.20.B. Tres tipos de cruzamiento.

2.2.2.2.4.1. Cruzamiento de un punto.

Si las cadenas se cortan en un solo punto, un esquema se romperá cuando la cadena que lo representa es cortada en algún punto entre los bits fijos del esquema, es decir, si se corta en algún lugar de los abarcados por $\delta(H)$.

En una cadena de longitud l existen $l-1$ posibles puntos de corte, así que la probabilidad de romper el esquema H con un corte es:

$$p_r \leq \frac{\delta(H)}{l-1}$$

El símbolo \leq se debe a que puede ocurrir que al cruzarse dos instancias de un esquema se generen, nuevamente, instancias de dicho esquema.

2.2.2.2.4.2. Cruzamiento de dos puntos.

Existen exactamente $\binom{l}{2}$ maneras de elegir dos puntos de corte de una cadena de longitud $l > 1$ considerándola como unida en sus extremos. Supóngase que en esta cadena se encuentra un esquema de longitud definida $\delta(H)$ y orden $\alpha(H)$. Si el orden del esquema es dos ($\alpha(H) = 2$), entonces H se rompe cuando uno de los puntos de corte cae dentro del segmento abarcado por $\delta(H)$ y el otro cae fuera de ese segmento, en alguno de los $l-\delta(H)$ lugares restantes. Es decir, la probabilidad de ruptura de un esquema de orden dos es:

$$\begin{aligned} P_{\delta(H),2} &= \frac{\delta(H)(l-\delta(H))}{\binom{l}{2}} \\ &= \frac{2\delta(H)(l-\delta(H))}{l(l-1)} \end{aligned} \quad (2.28.M)$$

En cambio, si se supone que el esquema tiene definidos todos los lugares abarcados por $\delta(H)$, es decir, $\alpha(H) = \delta(H) + 1$, entonces el esquema también se rompe siempre que los dos puntos de corte caen dentro del segmento considerado por $\delta(H)$, así que modificando 2.28 M se obtiene:

$$P_{\delta(H),\delta(H)+1} = \frac{\delta(H)(l-\delta(H)) + \binom{\delta(H)}{2}}{\binom{l}{2}}$$

En general:

$$P_{\delta(H),2} \leq p_r \leq P_{\delta(H),\delta(H)+1}$$

2.2.2.2.4.3. *Cruzamiento uniforme.*

Sean A y B dos cadenas que se desean cruzar para formar una cadena C y una D. En este tipo de cruzamiento cada posición de bit de la cadena C es ordenada entre A y B. La que resulte elegida aportará su valor correspondiente a la misma posición para que sea colocado en C y la perdedora aportará su bit correspondiente a D. Supóngase que se desea preservar un esquema H del que es representante alguna de las cadenas padre. Este esquema posee $o(H)$ bits fijos. No importa a cuál de los hijos vaya a dar el primer bit fijo de H. Lo que sí importa es que los restantes $o(H) - 1$ bits del esquema vayan a dar exactamente al mismo. Cada uno de estos bits tiene probabilidad $1/2$ de quedar en la misma cadena que el primero, así que la probabilidad de que los $o(H)$ bits del esquema sean copiados a la misma cadena resultante es:

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{o(H)-1}$$

Por lo tanto, la probabilidad de romper el esquema H es:

$$P_{\delta(H), o(H)} = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{o(H)-1}$$

Esto es en el peor de los casos, cuando los padres no coinciden en ninguna de las posiciones de interés para el esquema. En general:

$$p_r \leq 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{o(H)-1}$$

2.2.2.3. Críticas.

Se han hecho diversas críticas al teorema del esquema (un panorama general de ellas se puede encontrar en Whitley D.⁽⁵⁶⁾), las más importantes son:

- a) Sólo es una cota inferior, es decir, no es exacto.
- b) No es muy útil para predecir a largo plazo el comportamiento de un algoritmo genético.
- c) Sólo considera los efectos destructivos de los operadores genéticos y no los efectos constructivos.
- d) Es muy particular. Está hecho para un AGS con selección proporcional (de ruleta), cruzamiento de un punto y probabilidad de mutación uniforme.

Sin embargo, el teorema del esquema ha sido durante años uno de los pocos intentos formales para modelar los algoritmos genéticos y ha servido de punto de partida para otros modelos más recientes.

2.2.2.4. Paralelismo Implícito y la Hipótesis de los Bloques Constructivos (HBC).

El poder de los algoritmos genéticos reside en el hecho de que al procesar (evaluar) una sola cadena de una población, se evalúan, implícitamente, muchos esquemas en paralelo. Cada cadena binaria de longitud L es representante de 2^L esquemas (por cada una de las L posiciones se puede elegir el bit de la cadena o el *). Cada individuo de la población no es sólo el código de un elemento del dominio del problema sino que es, además, una muestra de varios subespacios de dicho dominio.

En el teorema del esquema, los esquemas más pequeños (de longitud de definición corta respecto de la longitud total de la cadena) sobreviven más fácilmente que los esquemas grandes ante el operador de cruza. Además, la selección favorece esquemas con una alta calificación (de elevada aptitud). Este par de indicios lleva a pensar que las soluciones encontradas por un algoritmo genético se construyen a lo largo de generaciones mezclando esquemas cortos y de alto grado de adaptación. A éstos se les denomina *bloques constructivos (building blocks)*, y a esta suposición la hipótesis de los bloques constructivos (HBC).

Hay bastante evidencia empírica que hace plausible la HBC. Sin embargo, también existen indicios que hacen pensar que no es verdadera, o al menos no en todos los casos. En general, el que la HBC sea cierta o no, depende del problema a resolver, así como de la codificación que se haya hecho del dominio. Un esquema de codificación en donde la interacción de los bits de la cadena genética (*epistasis*) es baja, favorece la propagación de bloques constructivos⁽⁹⁾.

2.2.3. Variaciones en el AGS.

El algoritmo genético simple (AGS) posee características arbitrarias muy particulares dentro de un esquema que permite, en principio, múltiples variantes. El AGS se caracteriza por utilizar un esquema de selección particular llamado selección proporcional, un esquema de cruzamiento de un solo punto de corte, mutaciones uniformemente distribuidas en la población y que opera con la misma probabilidad para todos los individuos durante todas las generaciones en que el AGS es ejecutado. También presenta un esquema de codificación del dominio del problema en cadenas binarias de una cierta longitud, que permanece fija al igual que el tamaño de las poblaciones que

constituyen las distintas generaciones del AG. Esto no tiene por qué ser siempre así, sino que además, en muchos casos no es conveniente que lo sea.

Existen casos considerables en que un genoma codificado en binario no es conveniente. Por ejemplo, el frecuentemente citado problema del agente viajero (TSP, por sus siglas en inglés) pertenece a este tipo. En pocas palabras, en el problema del agente viajero se trata de encontrar la trayectoria cíclica más corta que debe seguir el agente a través de todas las ciudades de un conjunto predefinido, visitando cada ciudad sólo una vez.

Un análisis previo acerca del problema del agente viajero puede sintetizarse como sigue:

1. Dependiendo del problema es posible elegir una codificación binaria para el dominio de búsqueda o no.
2. Se puede optar por un conjunto de operadores genéticos que aseguren que no se pueden generar cadenas inválidas o bien,
3. Un esquema que permita disminuir la probabilidad de aparición de cadenas inválidas castigándolas cuando aparecen y forzando al AG a aprender a no generarlas, u
4. Ocasionalmente se puede decidir cambiar el esquema de codificación del dominio para poder utilizar operadores más sencillos sin que se corra el riesgo de generar cadenas inválidas.
5. Es posible remapear la función objetivo para convertirla en una función de adaptación útil, o bien
6. Cambiar el esquema de selección por alguno que no requiera cambiar la función de adaptación

Las conclusiones anteriores son aplicables a una amplia gama de problemas en los que pueden presentarse todas o algunas de las condiciones analizadas.

Otras variantes que pueden ser introducidas a partir del algoritmo genético simple, es el de optimización de una función. Las alternativas para hacer esto se describen brevemente a continuación.

2.2.3.2. Codificación del dominio.

2.2.3.2.1. Codificación en punto fijo.

Se tienen varias opciones para codificar cada una de las entradas del vector (x, y) en cada individuo de una población. Una de ellas es la de utilizar el formato de punto fijo. Para hacer esto el primer paso es determinar, *a priori*, cuántos bits se utilizarán para codificar tanto la parte entera como la fraccionaria, de una entrada cualquiera en el vector. Este no es un problema trivial. En general, no se sabe en qué rango debe encontrarse el punto en el que la función tiene su máximo, así que al decidir *a priori* el conjunto de

valores representables puede ocurrir que ese punto se encuentre fuera de dicho conjunto y por lo tanto sea imposible hallarlo bajo el esquema elegido. Por desgracia, a menos que se sepa algo acerca del problema que permita restringir el dominio de búsqueda y por tanto elegir una codificación que lo cubra de la mejor manera posible, este problema no tiene solución.

2.2.3.2.2. Codificación binaria pesada.

El sistema numérico que aquí se ha llamado binario posicional o binario pesado es un caso particular de sistema numérico posicional cuya base es 2. Así cada dígito de un número binario en este sistema es, claramente 0 ó 1, y el valor de cada dígito dentro de un número es el múltiplo de la potencia de dos que le corresponde por su posición dentro del mismo.

2.2.3.2.3. Codificación binaria de Gray.

El esquema de codificación de Gray no es un sistema posicional y se utiliza en algoritmos genéticos por una característica peculiar. Ocurre que cualesquiera dos números consecutivos tienen un código de Gray que difiere en un solo bit, cosa que no ocurre con el esquema de codificación en binario pesado donde, por ejemplo, el 3 (011) difiere del 4 (100) en tres bits. Esto significa que en Gray los códigos de elementos del dominio que están cerca también están cerca, es decir, fenotipos cercanos se mapean en genotipos cercanos y viceversa.

2.2.3.2.4. Codificación en punto flotante.

Un número real en punto flotante con precisión sencilla se representa como una palabra de 4 bytes. El bit más a la izquierda del primer byte (B1) representa el signo del número; los bits del 6 al 0 de B1 y el bit más a la izquierda del byte 2 son el exponente del número. El exponente está representado en base 2 y se expresa en exceso 127, esto es, el exponente actual se obtiene restando 127 del número binario pesado convencional. Los 23 (32-9) bits restantes representan la mantisa. La mantisa está justificada a la izquierda y se supone que tiene un punto antes del número binario. Adicionalmente, se agrega al número un 1 implícito. El número hexadecimal 3F400000 en este formato representa al número decimal +0.75, mientras que el número hexadecimal C1200000 representa al número decimal -10.

2.2.3.2.1. Tres Algoritmos a partir del AGS.

En ocasiones el AG encuentra, en alguna generación, una buena aproximación a la solución del problema que se le ha planteado y que en la siguiente generación esta buena propuesta desaparece, casi con seguridad el promedio de la calificación de la población mejoró. Pero esa buena solución que se había encontrado ya no está en la población. Ocurre que en el AGS no existe ningún

medio para asegurar que esa buena aproximación que ya se encontró se preserve. Puede ocurrir que ni siquiera fuera seleccionada para dejar descendientes en la siguiente generación. Es cierto que el mejor individuo de la población tiene la más alta probabilidad de ser seleccionado por la ruleta, pero hay una probabilidad distinta de cero de que esto no ocurra. También puede ser que sea elegido y se pierda al cruzarse con algún otro seleccionado distinto de él mismo, o bien que logre sobrevivir a la cruce pero la mutación lo altere. En fin, no se provee de un mecanismo que asegure que el mejor individuo de la generación i pase intacto a la generación $i+1$. Esto trae como consecuencia que la mejor calificación de cada generación del AGS pueda fluctuar. Sería deseable que el comportamiento de la calificación máxima de la población fuera monótono. En específico no decreciente. Asegurar que el mejor individuo de la generación $i+1$ tendrá una calificación al menos tan alta como el mejor de la generación i .

Para lograr esto se inventó el *elitismo*. En términos generales este mecanismo consiste en conservar, en la generación i de un AG, a los k mejores individuos de las últimas r generaciones. En su variante más simple consiste en conservar (copiar sin alteraciones) al mejor individuo de la generación inmediata anterior. Esto asegura el comportamiento monótono de la mejor calificación por generación, también es condición necesaria y suficiente para la convergencia de un AG. En lo sucesivo se denotará como **AGT** el algoritmo genético simple al que se le ha añadido esta característica, es decir: **AGS + elitismo = AGT**.

El AGT es una variante sencilla del AGS, sin embargo, puede pensarse en variantes más complicadas. Una de éstas, es la que se ha denominado algoritmo genético ecléctico (**AGE**). En este algoritmo no convencional se incluyen las siguientes características: estrategia de selección determinística, elitismo, autoadaptación y la invocación aleatoria (siguiendo cierta estrategia) de un escalador de ascenso por mutación aleatoria.

Es suficiente saber que:

1. La *selección determinística* se refiere a que no es un proceso aleatorio de selección sino que, para cada individuo de la población está determinado, en función de su posición dentro de la misma de acuerdo con su adaptación, el individuo con el que deberá cruzarse.
2. La *autoadaptación* significa que ciertos parámetros de control del algoritmo, tales como la probabilidad de mutación y de cruce y algunos otros, son añadidos al genotipo de cada individuo en vez de ser dados *a priori* por el usuario del algoritmo. En la población inicial los valores de estos parámetros para cada individuo son elegidos aleatoriamente (en ciertos rangos) y se les somete, al igual que el resto del genoma, a los operadores genéticos. Para determinar el valor de estos parámetros que

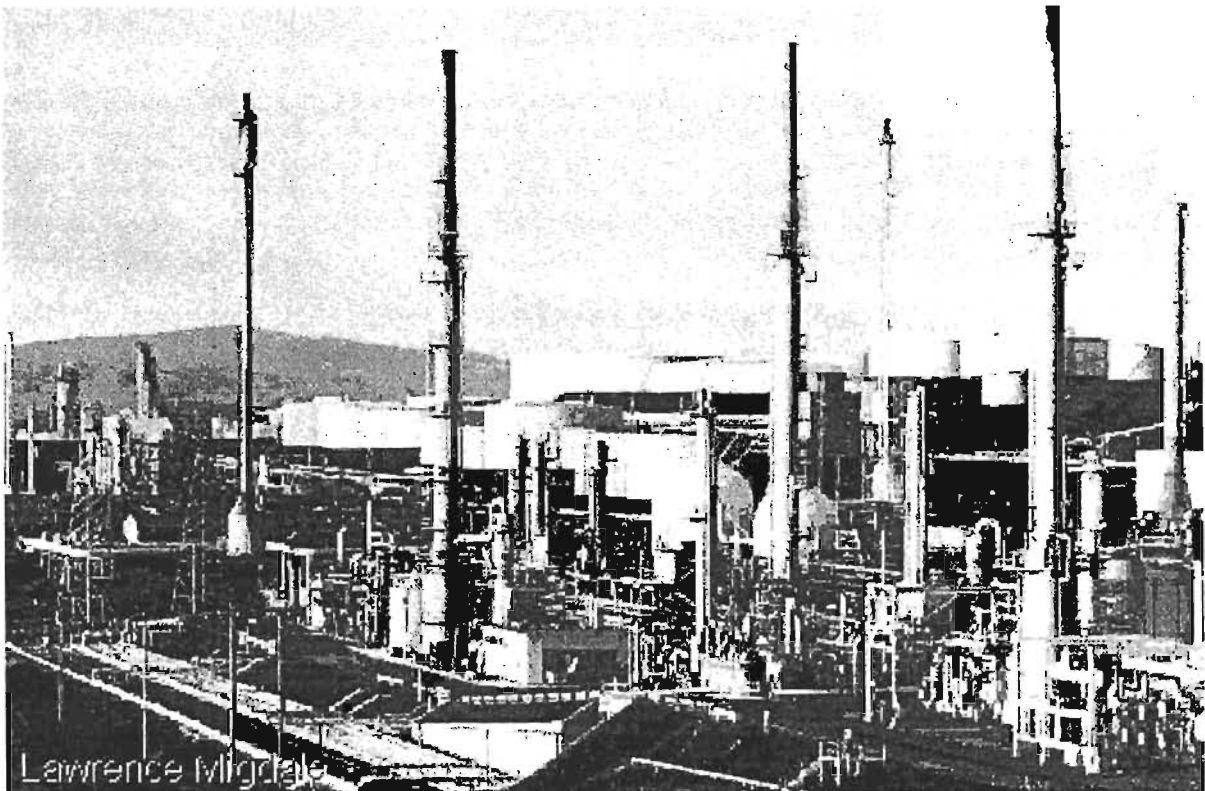
han de usarse efectivamente para cruzar y mutar a la población, se obtiene el promedio de los valores de dichos parámetros en los individuos.

3. En general, en el AGE existe un parámetro (también codificado en los individuos) que indica el número mínimo de veces que ha de ser invocado el escalador en cada generación.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

CAPITULO 3.

ESTRUCTURA Y ALGORITMO PARA LA EVALUACIÓN Y DISEÑO DE LOS SRP CONSIDERANDO REGIMEN PERMANENTE E ISOTERMICO.



CAPÍTULO 3. ESTRUCTURA Y ALGORITMO PARA LA EVALUACIÓN Y DISEÑO DE SISTEMAS DE RELEVO DE PRESIÓN CONSIDERANDO REGIMEN PERMANENTE E ISOTÉRMICO Y SU ENFOQUE CON AG's.

3.1. Enfoques de la Optimización de la Red de Tubería del SRP.

Actualmente se han propuesto diversos métodos para la optimización de la red de tubería que forma parte del Sistema de Relievo de Presión en una planta química, petroquímica o de proceso, tales métodos se han publicado en años recientes, y plantean la forma de llevar a cabo el cálculo y diseño óptimo de la red así como el modelo de optimización que se usa en cada caso.

En este capítulo se presentan algunos de los estudios realizados en este problema y el enfoque que plantea cada uno. Finalmente se plantea el algoritmo de cálculo para el dimensionamiento del cabezal del sistema de relievo de presión el cual será implementado en la planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Minatitlán.

3.1.1. Modelo de Optimización Utilizando Programación Lineal.

Esta formulación fue realizada por André Costa L. H, José L. de Madeiros, Fernando L. P. Pessoa⁽¹⁹⁾, 1999 y considera lo siguiente.

Una red de cabezales de relievo de presión debe permitir flujo máximo (sónico) a través de cada válvula de relievo. Esta especificación de diseño establece un límite superior en la presión corriente abajo (Contrapresión, back-pressure en inglés) de cada válvula. Por lo tanto hay un límite superior en la caída de presión de cada trayectoria válvula-quemador a lo largo de la red. El problema de diseño óptimo consiste en seleccionar el conjunto de diámetros relacionados al mínimo costo de la red sujetos a las restricciones de caída de presión.

Este trabajo propone una formulación del problema que implica la sustitución de diámetros como variables de decisión. En esta aproximación, cada *unión* de la red está formado por la conexión de una secuencia de segmentos de tubería que tienen diversos diámetros comerciales. Las variables de decisión se convierten en las longitudes de segmentos de tubería. La estructura matemática del problema resultante corresponde a un problema de Programación Lineal (PL) permitiendo soluciones rápidas y exactas. El presente esquema puede ser usado en el diseño de redes donde todos los caudales de cada *unión* son conocidos previamente (Es decir las redes deben ser estructuradas en forma de árbol con solo un sitio del quemador).

3.1.1.1. Modelo de Optimización.

3.1.1.1.1. Formulación Convencional.

Las variables de decisión son los diámetros de tubería de las *uniones* de red (una *unión* es una tubería entre dos nodos). De acuerdo a una formulación más realista, los diámetros son considerados variables discretas seleccionadas de una lista de diámetros comerciales. El problema se formula para reducir al mínimo la inversión de capital, representada por la suma de los costos de cada tubería. El costo de una tubería se considera proporcional a su longitud y el costo por unidad de longitud como una función lineal del diámetro. La función objetivo de una red que contiene S uniones es:

$$C(d_1, d_2, d_3, \dots, d_S) = \sum_{k=1}^S L_k (\alpha + \beta d_k) \quad (3.1)$$

Donde los coeficientes α y β son obtenidos por regresión lineal de los diámetros como función de su costo por unidad de longitud.

El flujo de gas en una tubería entre los puntos A y B puede ser modelado mediante (en unidades del SI):

$$P_A^2 - P_B^2 = \frac{0.3697 f (L + L_e) W^2 RT}{\pi^2 M d^5} \quad (3.2)$$

Donde P_A y P_B son las presiones en los extremos de la tubería, L es la longitud física de la tubería, L_e es la longitud equivalente, W es el flujo másico, R es la constante universal de los gases, T es la temperatura del gas, M es el peso molecular, d es el diámetro de la tubería y f es el factor de fricción calculado mediante:

$$f = 0.0475 \left[\frac{1.1744 * 10^{-12} W}{\mu d} \right]^{-0.186} \quad (3.3)$$

Donde μ es la viscosidad del gas. Las ecuaciones (3.2) y (3.3) corresponden a las ecuaciones descritas por Cardoso⁽¹⁾ et al. La sustitución de la ecuación (3.3) en la ecuación (3.2) se convierte, después del cambio en:

$$P_A^2 - P_B^2 = \frac{K (L + L_e)}{d^{4.814}} \quad (3.4)$$

Donde $K = (2.9078 \mu^{0.186} W^{1.814} RT) / (\pi^2 M)$. Usando la ecuación (3.4), la restricciones que imponen los límites superiores de caída de presión entre cada

nodo terminal t (válvulas de relevo, $t = 1, \dots, N$) y el quemador puede ser formuladas mediante

$$\sum_{k \in Q_t} (P_A^2 - P_B^2)_k = \sum_{k \in Q_t} \frac{K_k (L_k + Le_k)}{d_k^{4.814}} \leq b_t \quad (3.5)$$

Donde Q_t es el conjunto de uniones en la trayectoria entre el nodo terminal t y el quemador y b_t es el límite superior en la caída de presión a lo largo de esta trayectoria. Usando las ecuaciones presentadas anteriormente, el problema de optimización (**P1**) formulado en la literatura es (Cheng & Mah⁽¹⁴⁾; Cardoso et al.⁽¹¹⁾):

$$\text{Minimizar } C(d_1, d_2, d_3, \dots, d_s) = \sum_{k=1}^s L_k (\alpha + \beta d_k)$$

$$\text{Sujeto a } \sum_{k \in Q_t} \frac{K_k (L_k + Le_k)}{d_k^{4.814}} \leq b_t \quad \text{para } t=1, \dots, N$$

$$d_k \in SD = \{D_n/n = 1, \dots, ND\} \quad \text{para } k = 1, \dots, S$$

Donde SD es el conjunto de ND diámetros comerciales D_n disponibles. Es importante notar que el problema $P1$ involucra variables discretas y funciones no lineales, esto significa, que su solución es una tarea difícil.

3.1.1.1.2. Formulación propuesta.

Cada unión esta construido por una secuencia de segmentos de tubería que tienen diferentes diámetros comerciales. Las variables de decisión se convierten, para una unión k , en las longitudes de los segmentos de tubería x_{kn} que tienen diámetros estándar D_n . La suma de las longitudes de todos los segmentos de tubería que pertenecen a una unión es igual a la longitud de la unión,

$$\sum_{n=1}^{ND} x_{kn} = L_k \quad (3.6)$$

La función objetivo es la suma de los costos de todos los segmentos de tubería

$$C(x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{S,ND}) = \sum_{k=1}^s \sum_{n=1}^{ND} (\alpha + \beta D_n) x_{kn} \quad (3.7)$$

La caída de presión a lo largo de una unión es equivalente a la suma de caídas de presión en los segmentos de tubería. La caída de presión debido a accesorios (longitud equivalente) es considerada para ser distribuida a lo largo de los segmentos proporcionalmente a la fracción de longitud ocupada por cada segmento. Así el flujo en una unión k se describe por

$$(P_A^2 - P_B^2)_k = \sum_{n=1}^{ND} \left(\frac{K_k x_{kn}}{D_n^{4.814}} + \frac{K_k Le_k (x_{kn} / L_k)}{D_n^{4.814}} \right) \quad (3.8)$$

Las ecuaciones (3.6) – (3.8) se incorporan a la formulación propuesta (**P2**):

$$\text{Minimizar } C(x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{S,ND}) = \sum_{k=1}^S \sum_{n=1}^{ND} (\alpha + \beta D_n) x_{kn}$$

$$\text{Sujeto a } \sum_{k \in Q_t} \sum_{n=1}^{ND} \frac{K_k (1 - Le_k / L_k)}{D_n^{4.814}} x_{kn} \leq b_t \quad \text{para } t = 1, \dots, N$$

$$\sum_{n=1}^{ND} x_{kn} = L_k \quad \text{para } k = 1, \dots, S$$

$$x_{kn} \geq 0 \quad \forall k, \forall n$$

Puesto que la función objetivo y las restricciones de P2 son lineales en las variables de decisión x_{kn} , esta formulación es un problema de PL. Este tipo de problema es convexo (Es decir el óptimo local es óptimo global), con variables continuas y hay algoritmos de solución rápidos y eficientes para tratarlo.

En la solución de este problema mediante el método propuesto P2 puede darse el caso de que se obtengan segmentos de tubería con longitudes relativamente pequeñas; debido a que estos segmentos pequeños no son realistas, la solución es sometida a un proceso automático de *post tratamiento*. Para cada unión k , si la unión tiene mas de un segmento con longitud distinta de cero y presenta un segmento con longitud más pequeña que un límite inferior δ , entonces esta unión se convierte integralmente a la formada por el diámetro más grande que tiene una longitud distinta de cero presente en la solución original para esta unión.

La aplicación de este procedimiento de post procesamiento trae un ligero incremento de la función objetivo.

3.1.2. Modelo de Optimización de Programación No Lineal.

Murtagh⁽⁴¹⁾ realizó un trabajo sobre la aplicación de programación matemática a problemas para la determinación de la distribución óptima de flujos en redes. El problema tratado es el de una red en que se considera que los flujos a lo largo de la red son fijos. La caída máxima total en la energía potencial en cada trayectoria en el origen es también especificada. El problema es ajustar la resistencia en cada arco (sección de tubería) de una trayectoria para lograr un costo total mínimo de la red, considerado como una función de la resistencia.

El procedimiento planteado está dirigido a un problema de flujo compresible que fluye a través de una red de tuberías, que frecuentemente surge en el diseño de Ingeniería Química.

El problema de optimización que surge tiene una estructura particularmente simple, que es aprovechada formulando un segundo problema ("dual"), la solución de este también resuelve el problema original ("principal"). El concepto de dualidad en programación no lineal se ha considerado a menudo fuera de una exactitud matemática de poca estimación práctica. ("Tengo aun que ver un caso en el que el problema dual sea verdaderamente más fácil de resolver que el problema principal", Wolfe⁽⁵⁷⁾). Sin embargo, en este caso particular, el problema dual no es solamente agradable teóricamente, sino también mucho más fácil de resolver.

3.1.2.1. Planteamiento del Diseño del Cabezal de Relevó

Se considera que la configuración de la red de tubería está determinada por el esquema de los recipientes de la refinería. Así las longitudes de todas las secciones de tubería están especificadas y solo las variables de diseño restantes son sus diámetros.

El problema es seleccionar los diámetros de tubería en cada trayectoria de la válvula al quemador para que la caída de presión total de la trayectoria permanezca dentro de un límite especificado previamente. Considerando que la presión en el quemador está especificada (Generalmente ligeramente por encima de la presión atmosférica), el límite es impuesto para que la contrapresión en la tubería a la válvula sea inferior al valor crítico, asegurando así velocidad sónica en la garganta de la válvula.

También algunas secciones de tubería son comunes en muchas trayectorias por lo cual el problema no puede resolverse para cada trayectoria individualmente. En la formulación del problema de optimización, se impusieron todas las limitaciones de caída de presión como un conjunto de restricciones, y se elige como la "mejor" solución factible al conjunto de diámetros de tubería que minimizan el peso total de la tubería.

El peso por unidad de longitud de tubería se considera como una función lineal del diámetro (Esta es una consideración válida cuando el diámetro es mucho más grande que el espesor):

$$w_i = \alpha + \beta d_i \quad [=] \text{ lb / ft.} \quad (3.9)$$

Donde d_i es el diámetro en pulgadas y el subíndice i se refiere al número de sección de tubería. Los coeficientes α y β son obtenidos mediante regresión lineal.

Siguiendo los estándares de diseño API-RP 520⁽⁴¹⁾, la ecuación apropiada es la utilizada para flujo isotérmico de un fluido compresible. Esta ecuación toma la forma:

$$P_A^2 - P_B^2 = \frac{64 f L W^2 R T}{\pi^2 g_c M D^5} \left(1 + \frac{4.61 D}{4 f L} \times \log_{10} \frac{P_A}{P_B} \right) \quad (3.10)$$

Donde f = factor de fricción

$$\begin{aligned} &= 0.0475 (\text{Re})^{-0.186} \\ &= 0.0475 \left(\frac{1894 W}{\mu D} \right)^{-0.186} \end{aligned} \quad (3.11)$$

(Esta ecuación da un valor conservador del factor de fricción).

- P_A = Presión de entrada [=] lb_f/ft^2 (absolutas)
- P_B = Presión de salida [=] lb_f/ft^2 (absolutas)
- D = Diámetro [=] ft
- L = Longitud de tubería [=] ft
- W = Flujo másico [=] lb/s
- R = Constante de los gases = 1546 (ft $\text{lb}_f/\text{lbmol}^\circ\text{R}$)
- T = Temperatura absoluta [=] $^\circ\text{R}$
- M = Peso molecular [=] lb/lbmol
- g_c = 32.17 [=] $\text{lb ft/lb}_f \text{ s}^2$
- μ = Viscosidad [=] centipoise

Para algunas secciones de tubería, los primeros tres términos anteriores varían, mientras los otros permanecen constantes. Las propiedades en las válvulas están especificadas, y las propiedades corriente abajo, son calculadas mediante reglas simples de mezclado.

La caída de presión sobre cada sección de tubería esta dada por una ecuación de la forma de (3.10). Representando todos los términos constantes mediante una constante, K_i , para cada sección de tubería, i , y (dejando la presencia del

subíndice como se había entendido), la ecuación (3.10) con (3.11) se convierte a:

$$P_i^2 - P_{i-1}^2 = \frac{K_i C_i}{d_i^{4.814}} \quad (3.12)$$

Donde C_i representa el término entre paréntesis de la ecuación (3.10), el factor de corrección de energía cinética, P_i y P_{i-1} son las presiones de entrada y salida respectivamente. Note que C_i es una función de P_i y P_{i-1} ; sin embargo se ignora este hecho para el presente y se trata como una constante. (Este punto será discutido después).

Considerando r tuberías en serie numeradas desde 1 hasta r consecutivamente; las caídas de presión individuales son calculadas mediante recursión:

$$\begin{aligned} P_1^2 - P_0^2 &= \frac{K_1 C_1}{d_1^{4.814}} \\ P_2^2 - P_1^2 &= \frac{K_2 C_2}{d_2^{4.814}} \\ &\vdots \\ P_r^2 - P_{r-1}^2 &= \frac{K_r C_r}{d_r^{4.814}} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Por lo tanto, sumando:

$$P_r^2 - P_0^2 = \frac{K_1 C_1}{d_1^{4.814}} + \frac{K_2 C_2}{d_2^{4.814}} + \dots + \frac{K_r C_r}{d_r^{4.814}} \quad (3.14)$$

Donde P_r y P_0 son las presiones de entrada y salida respectivamente.

El problema es ajustar cada diámetro, d_i , para minimizar la suma de $L_i w_i$ en todas las secciones de tubería, i , mientras se obedecen las limitaciones de caída de presión de la forma dada por la ecuación (3.14).

3.1.2.2. **Formulación Fundamental del Problema de Optimización.**

Problemas de optimización no lineal restringidos linealmente pueden ser expresados en la forma:

$$\text{Minimizar } f(x) = f(x_1, \dots, x_n) \quad (3.15)$$

$$\text{Sujeto a } \sum_{i=1}^n a_{ij} \leq b_j \quad j = 1, \dots, m \quad (3.16)$$

Donde n es el número de variables, y m es el número de restricciones, $f(x)$ representa la función objetivo, que normalmente expresa alguna forma de costos asociados con los valores de las variables independientes, x_i , $i = 1, \dots, n$, a_{ij} es el coeficiente de la variable i en la restricción j y b_j es el término constante correspondiente. Geométricamente, las ecuaciones

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} - b_j = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (3.16 a)$$

representan hiperplanos n -dimensionales que forman límites en la región factible en el que el punto x puede estar. Una restricción j es estimada para ser activa si el punto actual satisface (3.16) exactamente, para que la igualdad de signos se mantenga.

Mediante la introducción de alguna notación conveniente, es posible expresar el problema descrito en la sección anterior en la forma de (3.15) y (3.16). Sea n el número de secciones de tubería y m el número de trayectorias. Asignar un único número entre 1 y n a cada sección de tubería, y un único número entre 1 y m a cada válvula. Es evidente que este último conjunto de números puede ser usado para referirse a la válvula en si misma y a la trayectoria de la válvula al quemador puesto que hay una correspondencia 1 a 1. El subíndice i representa el número de sección de tubería, y el subíndice j representa el número de trayectoria. Sea S_j el conjunto de números de secciones de tubería en la trayectoria j . Entonces, por ejemplo

$$\begin{aligned} S_1 &= (1, 9, 13, 15) \\ S_2 &= (2, 9, 13, 15) \\ &\vdots \\ S_8 &= (8, 12, 14, 15) \end{aligned}$$

La función objetivo puede expresarse simplemente como la suma de los pesos de cada sección de tubería:

De la ecuación (3.9):

$$f(d_1, \dots, d_n) = \sum_{i=1}^n L_i (\alpha + \beta d_i) \quad (3.17)$$

Las restricciones pueden también ser escritas a continuación fácilmente con la ayuda de la notación anterior. Serán m ecuaciones de caída de presión de la forma de la ecuación (3.14), una para cada trayectoria j , $j = 1, \dots, m$. Ellas

pueden ser expresadas como restricciones de desigualdad mediante el uso de la presión máxima permisible de entrada en lugar de la presión actual de entrada:

$$\text{Sea } b_j = P_j^2 \text{ espec.} - P_0^2 \quad j = 1, \dots, m \quad (3.18)$$

Donde $P_j \text{ espec.}$ Es la contrapresión máxima permisible especificada en la válvula j , y P_0 es la presión en el quemador.

$$\text{Sea } a_{ij} = \begin{cases} KiCi, & i \in S_j \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m \\ 0, & i \notin S_j \end{cases} \quad (3.19)$$

Para hacer las restricciones lineales, introducimos la transformación:

$$x_i = \frac{1}{d^{4.814}} \quad i = 1, \dots, m \quad (3.20)$$

Entonces tenemos el problema:

$$\text{Minimizar } f(x) = \sum_{i=1}^n L_i (\alpha + \beta x_i^{-0.2077}) \quad (3.21)$$

$$\text{Sujeto a } \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \leq b_j \quad j = 1, \dots, m \quad (3.22)$$

Que es la forma deseada.

Hay también restricciones auxiliares en la forma de límites inferiores en los diámetros de tubería:

$$d_i \geq d_i^{\min.} > 0 \Rightarrow x_i \leq x_i^{\max.} < \infty \quad i = 1, \dots, n \quad (3.23)$$

donde $d_i^{\min.}$ es el diámetro mínimo de la sección de tubería i , y

$$x_i^{\max.} = \left(\frac{1}{d_i^{\min.}} \right)^{4.814} \quad i = 1, \dots, n \quad (3.20 a)$$

Estas restricciones están formadas por el requerimiento que el diámetro de todas las secciones de tubería en alguna trayectoria j deben ser mayor o igual que el de la válvula de relevo j . Por lo tanto, cada $d_i^{\min.}$, $i = 1, \dots, n$, es encontrado

considerando todas las trayectorias j en que la sección i se encuentra, y toma el más grande de todos los diámetros de la válvula correspondientes.

Puesto que el número de secciones de tubería, n , es siempre mucho mayor que el número de trayectorias, m , es atractivo considerar la posibilidad de reducir la dimensionalidad del problema de optimización de n a m .

3.1.2.3. Conceptos Considerados de la Teoría de Dualidad.

Se describen brevemente aquellos elementos esenciales de la teoría de dualidad de programación no lineal que son requeridos en este estudio. La Teoría de la Dualidad ha sido puesta en diversas apariencias, pero el concepto más fácilmente visualizado es el de un punto silla de una función Lagrangiana asociada. El problema principal involucra minimizar en un espacio de variables, mientras que el problema dual involucra maximizar en otro espacio de variables. Bajo ciertas condiciones de regularidad, las dos soluciones son iguales y corresponden a un punto silla (no necesariamente un punto estacionario) de la función Lagrangiana en el espacio combinado de ambas variables.

Considere el problema expresado por (3.15) y (3.16). Usando multiplicadores de Lagrange, λ_j , para unir las ecuaciones de restricción a la función objetivo obtenemos la función Lagrangiana, que toma la forma:

$$\phi(x, \lambda) = f(x) - \sum_{j=1}^m \lambda_j \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i - b_j \right) \quad (3.24)$$

Kuhn y Tucker⁽³⁹⁾ han presentado un conjunto de condiciones necesarias y suficientes para la existencia de una solución para (3.15) y (3.16). En términos de la función Lagrangiana, (3.24), puede establecerse como sigue:

Si \bar{x} resuelve (3.15) y (3.16), entonces, (considerando que $f(\bar{x})$ es diferenciable), existe una $\bar{\lambda}$ tal que:

$$1. \frac{\partial \phi}{\partial x}(\bar{x}, \bar{\lambda}) = 0 \text{ es decir } \frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^m a_{ij} \bar{\lambda}_j \quad i = 1, \dots, n \quad (3.25)$$

Esto significa que el gradiente de la función objetivo debe ser ortogonal a la superficie formada por los límites de las restricciones lineales activas, para que ningún otro progreso pueda hacerse.

$$2. \frac{\partial \phi}{\partial \lambda}(\bar{x}, \bar{\lambda}) \geq 0 \text{ es decir } \sum_{i=1}^n a_{ij} \bar{x}_i - b_j \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (3.26)$$

Esto indica simplemente que el punto \bar{x} debe ser factible, es decir satisface las restricciones dadas por (3.16).

$$3. \bar{\lambda} \leq 0 \text{ es decir } \bar{\lambda}_j \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (3.27)$$

Esto, en conjunción con (3.27), significa que la dirección del gradiente negativo debe estar apuntando ortogonalmente hacia afuera de la región factible, (si estuviera apuntando hacia adentro con respecto a cualquier restricción dada, el progreso adicional podría ser hecho obviamente moviéndose de ese límite de la restricción).

$$4. \bar{\lambda}^T \frac{\partial \phi}{\partial x}(\bar{x}, \bar{\lambda}) = 0, \text{ es decir, } \bar{\lambda}_j = 0 \text{ o } \sum_{i=1}^n a_{ij} \bar{x}_i - b_j = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (3.28)$$

Esto significa que si \bar{x} no esta en el límite de alguna restricción, j , entonces, su multiplicador de Lagrange correspondiente, $\bar{\lambda}_j$, es cero.

Estas cuatro condiciones son necesarias, y también suficientes si el problema de optimización es convexo. Las desigualdades (3.26) y (3.27) reflejan el hecho de que las restricciones (3.26) son restricciones de desigualdad; para restricciones de igualdad (3.26) deben ser una igualdad y los multiplicadores de Lagrange correspondientes deben ser no restringidos en signo.

Mediante la consideración de las relaciones del lado izquierdo en las ecuaciones (3.25) – (3.28), es evidente que, bajo consideraciones de convexidad, la condiciones de Kuhn-Tucker son también necesarias y suficientes para la existencia de un punto silla de $\phi(x, \lambda)$ en $(\bar{x}, \bar{\lambda})$.

$$\text{Es decir, } \phi(\bar{x}, \lambda) \leq \phi(\bar{x}, \bar{\lambda}) \leq \phi(x, \bar{\lambda}) \text{ para todo } \lambda \leq 0, x \in E^n. \quad (3.29)$$

Así la solución de (3.15) y (3.16) puede ser obtenida resolviendo el problema del punto silla:

$$\begin{array}{ll} \text{Minimizar} & \text{Maximizar } \phi(x, \lambda) \\ x \in E^n & \lambda \leq 0 \end{array} \quad (3.30)$$

Considerar la función definida como sigue:

$$\gamma(\lambda) = \text{minimizar } \phi(x, \lambda) \\ x \in E^n, \lambda \text{ fijada.} \quad (3.31)$$

Debemos llamar a esta la función dual. Siempre que esta función exista para todos los $\lambda \leq 0$ y que $\phi(x, \lambda)$ logre un mínimo finito, la solución del problema del punto silla es obtenido resolviendo el problema dual:

$$\begin{array}{ll} \text{Maximizar } \gamma(\lambda) \text{ o, alternativamente minimizar } -\gamma(\lambda) & \\ \lambda \leq 0 & \lambda \leq 0 \end{array} \quad (3.32)$$

Esto es, de hecho, posible generalizar la definición de la función dual a la forma:

$$\begin{array}{l} \gamma(\lambda) = \min \phi(x, \lambda) \\ x \in R, \lambda \text{ fijada.} \end{array} \quad (3.31 \text{ a})$$

Donde R es un subconjunto de E^n . Esto equivale a dividir el conjunto original de restricciones en dos conjuntos: un conjunto es asociado a la función objetivo con multiplicadores de Lagrange para formar la función Lagrangiana, y el otro conjunto restante proporciona restricciones en el problema de minimización asociado, implicado en la ecuación (3.31).

El problema dual, (3.32), parece ilusoriamente simple; este es un problema m-dimensional y solo las restricciones son los límites superiores simples. Sin embargo, note de (3.31), que cada evaluación de la función dual involucra una minimización completa. A menos que la estructura del problema haga esta minimización relativamente simple, hay una pequeña ventaja considerando el problema dual en preferencia al problema principal.

Hay otras dificultades en estar seguro que el problema dual es un problema de programación convexo, incluso aunque el problema principal puede ser convexo. Una condición suficiente que asegura que el problema dual es convexo es que las restricciones principales sean convexas, y que la función objetivo principal sea estrictamente convexa.

La teoría de la dualidad también forma las bases de diversas técnicas de descomposición en programación lineal y no lineal

3.1.2.4. **Formulación del Problema Dual.**

Considere la estructura de la red del problema de optimización formulado en la sección anterior. El costo total del sistema es la suma de los costos de cada sección de tubería, para que sin tener en cuenta de que modo se expresa este costo, la función objetivo sea siempre separable dentro de una suma de funciones de las variables individuales $x_i, i=1, \dots, n$.

$$\text{Es decir} \quad f(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i) \quad (3.33)$$

Note también, que para expresar el costo, como el peso de cada sección de tubería, la forma de cada función individual es la misma para cada variable:

$$f_i(x_i) = L_i(\alpha + \beta x_i^{-0.2077}) \quad i = 1, \dots, n \quad (3.34)$$

La gráfica de esta función se muestra en la figura 3.1, se observa que en la región de interés, $x_i > 0$, $f_i(x_i)$ es monótonamente decreciente y limitada inferiormente por un valor asintótico de $L_i\alpha$. Sin tener en cuenta las otras restricciones lineales, el límite superior, x_i^{\max} , en cada variable podría solo evitar este valor asintótico siendo aproximado. En la región $0 < x_i \leq x_i^{\max}$, $i = 1, \dots, n$, la segunda derivada de cada $f_i(x_i)$ es mayor que cero, que es una condición suficiente para que $f_i(x_i)$ sea estrictamente convexa, y por lo tanto $f(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i)$ sea estrictamente convexa.

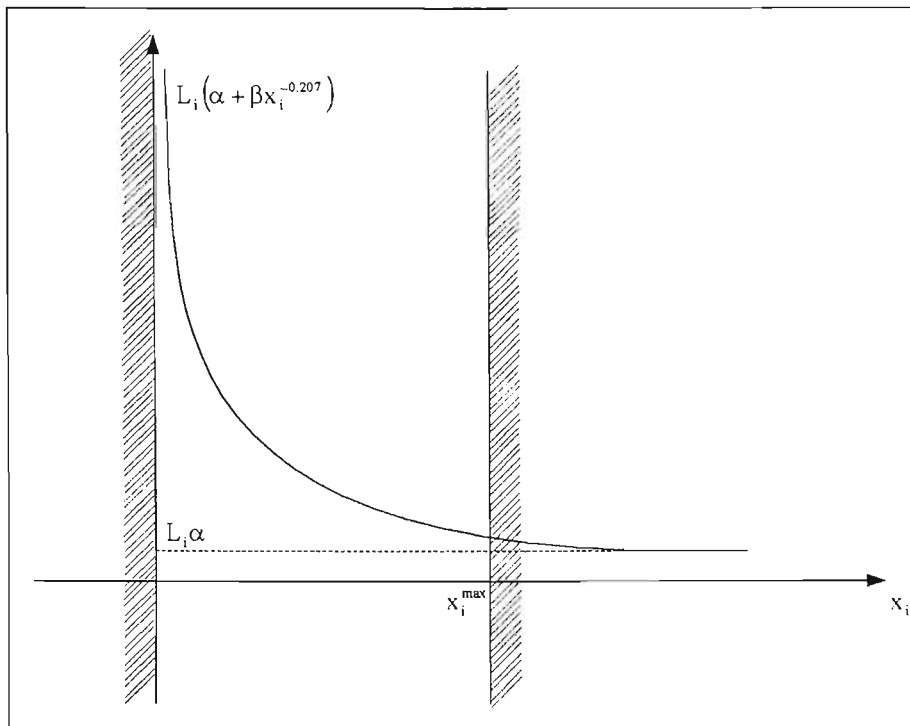


Figura 3.1. Forma de la función objetivo para una sección de tubería individual.

Las restricciones lineales representadas por la ecuación 3.22 no forman una región factible cerrada; sin embargo los coeficientes a_{ij} y b_j son todas positivas y así proporcionan un limite superior en cada x_i , que corresponde a la dirección del valor de la función decreciente.

Considerando solo las restricciones lineales dadas por (3.22), la función Lagrangiana correspondiente a (3.21) y (3.22) toman la forma:

$$\begin{aligned} \phi(x, \lambda) &= \sum_{i=1}^n L_i(\alpha + \beta x_i^{-0.2077}) - \sum_{j=1}^m \lambda_j \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i - b_j \right) = \\ & \sum_{i=1}^n \left[L_i(\alpha + \beta x_i^{-0.2077}) - \sum_{j=1}^m \lambda_j (a_{ij} x_i - b_j) \right] \end{aligned} \quad (3.35)$$

La cual, sucesivamente, es estrictamente convexa en x en el rango $0 < x \leq x^{\max}$ para toda $\lambda = 0$.

Definir las funciones duales como sigue:

$$\begin{aligned} \gamma(\lambda) &= \min \phi(x, \lambda) \\ \text{sobre} \\ x \in R &= \{x \mid 0 < x_i \leq x_i^{\max}, i = 1, \dots, n\} \end{aligned} \quad (3.36)$$

λ fijada.

La solución del problema de minimización implicado en la ecuación (3.36) es obtenida analíticamente. Para un punto estacionario, tenemos:

$$\frac{\partial \phi(x, \lambda)}{\partial x_i} = 0 \quad \text{a} \quad x_i = \left(- \sum_{j=1}^m \lambda_j a_{ij} / L_i \beta 0.2077 \right)^{-1/0.2077} \quad (3.37)$$

$$= x_i^*(\lambda) \quad (3.38)$$

Esto debe ser un mínimo si $x_i^*(\lambda) \leq x_i^{\max}$, debido a la convexidad estricta de la función Lagrangiana. Note que esto es finito a menos que $\lambda_j (\leq 0)$ sea cero para todas las trayectorias j tal que $i \in S_j$.

$$\hat{x}(\lambda) = \min \text{ de } (x_i^*(\lambda), x_i^{\max}), i = 1, \dots, n \quad (3.39)$$

Esto existe, y es único y finito, para todo $\lambda_j \leq 0$. La función dual para nuestro problema en particular es así:

$$\begin{aligned} \gamma(\lambda) &= \phi(\hat{x}(\lambda), \lambda) \\ &= \sum_{i=1}^n L_i(\alpha + \beta \hat{x}_i(\lambda)^{-0.2077}) - \sum_{j=1}^m \lambda_j \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} \hat{x}_i(\lambda) - b_j \right) \end{aligned} \quad (3.40)$$

con $\hat{x}(\lambda)$ dada por (3.39).

El gradiente de la función dual, que existe y es continuo para toda $\lambda_j \leq 0, j = 1, \dots, m$, es:

$$\frac{\partial \gamma(\lambda)}{\partial \lambda_j} = - \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i(\lambda) - b_j \right) \quad j = 1, \dots, m \quad (3.41)$$

Por consiguiente podemos usar un método de minimización de proyección del gradiente para resolver el problema dual restringido linealmente:

$$\text{Minimizar } -\gamma(\lambda) \quad (3.42)$$

$$\text{Sujeto a } \lambda_j \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (3.43)$$

La dimensionalidad del problema para ser resuelto ha sido reducido de n a m , y la tarea de calcular los n diámetros de tubería óptimos, $d_i, i = 1, \dots, n$, ha sido reducido a un subproblema trivial.

Un diagrama de flujo del procedimiento para resolver el problema dual se muestra en la figura 3.2, los pasos que son tomados están a continuación:

- (1) Asumir un conjunto inicial de valores $\lambda_j, j = 1, \dots, m$ todos menores que cero.
- (2) Calcular los valores óptimos de $x_i, i = 1, \dots, n$, para los λ dados por las ecuaciones (3.38) y (3.39).
- (3) Calcular el valor de la función objetivo dual por la ec. (3.40) y su gradiente de la ecuación (3.41) (Note que se desea maximizar el problema dual, así la función objetivo en un programa de minimización es el negativo de el problema dual).
- (4) Comprobar condiciones de optimalidad. Si el valor considerado de λ es óptimo, detenerse. De lo contrario, usar el programa de minimización de proyección del gradiente para asignar un nuevo valor de $\lambda \leq 0$. Volver al paso 2.

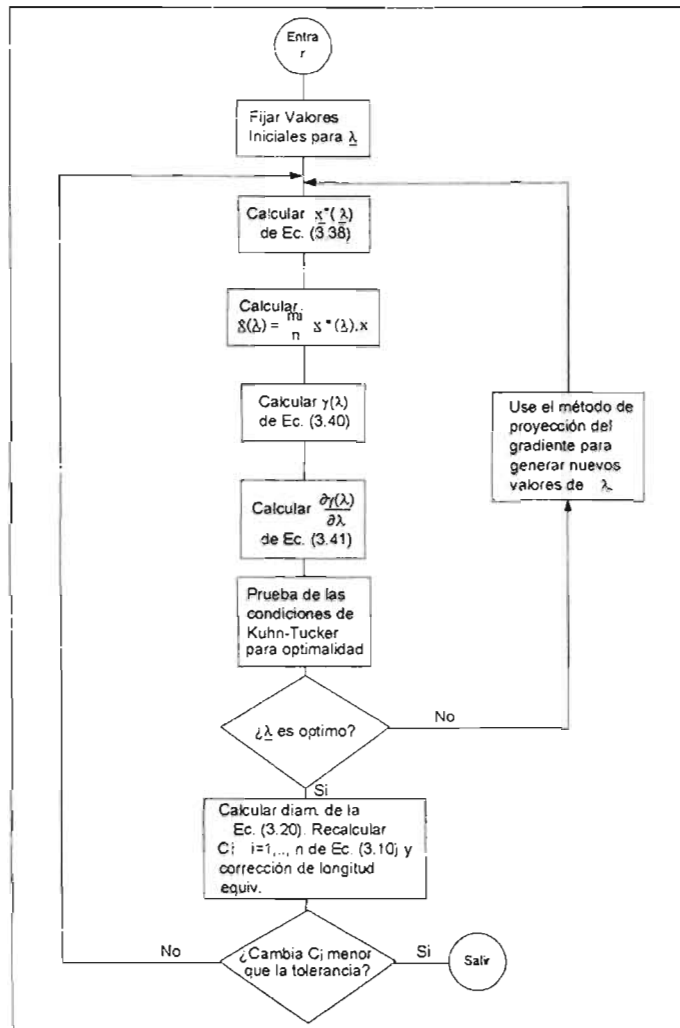


Figura 3.2. Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo.

La convexidad estricta en x de la función Lagrangiana $\phi(x, \lambda)$ en el rango $0 < x_i \leq x_i^{\max}$ para todos los valores de $\lambda \leq 0$ asegura un valor único de $x(\lambda)$. La convexidad simple de la función Lagrangiana puede, en general, dar lugar aun punto no único $x(\lambda)$ que solucione el subproblema dual, y es evidente que la complicación de no obtener un valor único se trasmite a la evaluación del gradiente de la función dual.

Para propósitos de computadora, podemos evitar dificultad con la desigualdad estricta en la definición de la región R estableciendo un límite inferior ϵ , en x_i , $i = 1, \dots, n$, donde ϵ es una constante pequeña positiva escogida para asegurar que ninguna dificultad surja a causa de redondear errores. En la región R , las condiciones suficientes para un problema dual convexo están

satisfechas para que cualquier óptimo encontrado en el paso 4 del procedimiento anterior será global sobre R.

Las restricciones que son usadas para definir R no obstante facilitan a $\hat{x}(\lambda)$ escribirse término por término. Es posible incorporar cualquier forma de límite inferior y superior en cada variable sin perder esta habilidad, pero esta habilidad es inmediatamente pérdida si una restricción usada para definir R contiene términos en más de una variable. Tales restricciones deben ser unidas a la función Lagrangiana, cada una requiere un multiplicador de Lagrange adicional, y es evidente que cualquier ventaja en la dimensionalidad del problema dual esta pérdida si hay un número grande de estas. Note que el límite superior, x_i^{\max} , mantiene cada $x_i(\lambda)$ finita y de este modo el diámetro correspondiente es mayor que cero. Note también que para cada trayectoria j, hay por lo menos una sección de tubería i (la sección adyacente a la válvula) que esta solo en la trayectoria, es decir, hay una i por lo menos para que

$$\sum_{j=1}^m \lambda_j a_{ij}$$

tenga solo un término a_{ij} diferente de cero. Si los límites x_i^{\max} , $i = 1, \dots, n$ estuvieran ausentes, entonces a todos los óptimos λ_j , $j = 1, \dots, m$, podrían ser diferentes de cero que significa que todas las restricciones del problema principal dado por la ecuación (3.22) podrían ser activas. La interpretación física de esto es que los diámetros se apretarían abajo para utilizar la caída de presión máxima disponible en cada trayectoria, a menudo resultando en diámetros ridículamente pequeños en las secciones adyacentes a la válvula.

Tenemos remotamente de esta manera considerando el factor de corrección de energía cinética, C_i , $i = 1, \dots, n$, para ser constante. Mientras esto es cierto para fluidos de flujo incompresibles, será visto de la ecuación (3.10) que para flujos de fluidos compresible cada C_i depende de una manera no lineal en el diámetro y presiones finales de cada sección. Es por consiguiente necesario en esta aplicación particular construir un ciclo iterativo exterior (Ver figura 3.2) en que las válvulas de C_i son recalculadas usando los diámetros óptimos y las caídas de presión resultantes. No es posible demostrar que semejante ciclo convergerá a la solución correcta, o que convergerá en lo absoluto. A lo largo de esta línea, es posible obtener una medida correcta de la discrepancia actual en las restricciones a cada iteración; dados los diámetros de cada sección y empezando con la presión del quemador conocida, P_0 , es posible mostrar la secuencia del cálculo de la presión por iteración

$$P_i^{r+1} = f(P_i^r) \tag{3.44}$$

por cada sección donde,

$$f(P_i^r) = \left(P_{i-1}^2 + \frac{K_i}{d_i^{0.814}} \times \left[1 + \bar{K}_i d_i^{0.814} \log_{10} \left(\frac{P_i^r}{P_{i-1}} \right) \right] \right)^{1/2} \quad (3.45)$$

y donde $\bar{K}_i = 4.61/4f_i L_i d_i^{0.814}$ convergerá para todos los valores de P_{i-1} y d_i en el rango de interés. Así es posible calcular la contrapresión actual en cada válvula, \bar{P}_j , y determinar la discrepancia, $\bar{P}_j - P_j$ espec. en la caída de presión total para esas restricciones j que son activas.

Es posible también obtener una estimación de la penalidad incurrida en la función objetivo para cada uno de estos. Sea $\bar{b}_j = \bar{P}_j^2 - P_0^2$, y $\Delta b = \bar{b}_j - b_j$.

Considerándose λ_j una medida de la magnitud para que el valor óptimo de la función objetivo, sea \bar{f} , que debería ser disminuido por incrementar el límite b_j en la restricción, es decir, $\lambda_j = (\partial \bar{f}(\bar{x}) / \partial b_j)$. Se puede conseguir una estimación aproximada del efecto de cada discrepancia en la función objetivo para el término $\lambda_j \Delta b_j$ (Esto es solamente una estimación aproximada ya que se consideran que \bar{x} aproxima la solución al problema con el límite de b_j en cada restricción j , y Δb_j es suficientemente pequeña para que una estimación de primer orden sea adecuada).

3.1.2.5. Conclusiones.

El método de optimización usado para resolver los problemas es un método de proyección métrico variable, así llamado porque aumenta y utiliza una aproximación a la matriz inversa local de la segunda derivada parcial de la función objetivo.

Para hacer una evaluación comparativa de las formulaciones originales y duales se resolvieron problemas de dimensión media. El problema dual fue de forma consistente mas fácilmente solucionado, ambos en términos del número de cálculos requeridos de la función y el tiempo de la ejecución total.

La solución obtenida es sujeta a un tratamiento post-óptimo que selecciona los diámetros de tubería comerciales apropiados por una búsqueda enumerativa parcialmente y verifica también para la velocidad crítica en cada sección de tubería.

La aproximación presentada en este documento no esta restringida a sistemas de flujo de fluido, sino que puede aplicarse a cualquier sistema cuya

configuración pueda ser representada por una red. La aproximación puede ser aplicada de una manera sencilla, a ecuaciones de la forma: $(\text{Caída de potencial})^{j1} = (\text{Flujo})^{j2} \times \text{Resistencia}^{j3}$. También las ecuaciones que describen el sistema que está siendo optimizado son consideradas para ser no lineales, en el caso de sistemas lineales el uso de programación lineal ya está bien establecida. Uno puede ser a menudo dependiente en la no linealidad de las ecuaciones de flujo con respecto a las variables independientes para obtener una función objetivo fundamental estrictamente convexa.

El número de secciones siempre será mayor que el número de trayectorias, sin tener en cuenta la configuración de la red, así que parecería que la formulación dual siempre sería una alternativa atractiva en tales aplicaciones.

3.1.3. Modelo de Optimización Utilizando Algoritmos Genéticos.

Esta formulación también fue realizada por André Costa L. H, José L. de Madeiros, Fernando L. P. Pessoa.⁽¹⁸⁾ (1999). Y considera lo siguiente.

El problema de diseño de una red óptima consiste en la selección del conjunto de diámetros de tuberías correspondientes al mínimo costo de capital de acuerdo con los límites superiores de caída de presión debido a las especificaciones de diseño.

El objetivo de este trabajo es presentar un procedimiento de solución para el diseño óptimo de la red usando Algoritmos Genéticos (GAs). La búsqueda hacia el diseño óptimo es guiada mediante una regla heurística que considera el comportamiento del sistema. La presión selectiva es acentuada por el *escalamiento de la aptitud* y el concepto propuesto de *subpoblación reproductiva*. Estas características aumentan el funcionamiento del algoritmo, así, el esfuerzo numérico para la solución del problema se reduce.

Este trabajo presenta un procedimiento para el diseño óptimo de redes de cabezales de relevo de presión basado en la utilización de algoritmos genéticos. Estos métodos encontrados son herramientas relativamente recientes que tratan de reproducir computacionalmente los fenómenos involucrados en procesos de evolución.

3.1.3.1. Formulación del Problema.

El objetivo de la optimización es minimizar el capital de inversión de la red. La inversión es calculada mediante la suma de los costos de cada unión (Sección de tubería) de la red. El costo de una unión está dado por el producto de la longitud de tubería y el costo por unidad de longitud, evaluado por una función lineal de su diámetro. En una red con S "links" de diámetros d_k y longitud L_k , la función objetivo está dada por la ecuación 3.1.

La estructura del problema es la representada en la sección 3.1.1.1.1 y utiliza las ecuaciones 3.2 -3.8.

El problema de optimización planteado queda de la forma:

$$\text{Minimizar } C(d_1, d_2, \dots, d_s) = \sum_{k=1}^s L_k (\alpha + \beta d_k)$$

Sujeto a

$$\sum_{k \in Q} \frac{K_k (L_k + Le_k)}{d_k^{4.814}} \leq b_t \quad \text{para } t = 1, \dots, N$$

$$d_k \in SD = \{D_n / n = 1, \dots, ND\} \quad \text{para } k = 1, \dots, S$$

Donde SD es el juego de ND diámetros comerciales D_n .

Esta formulación considera que todos los flujos de cada unión son previamente conocidos, por ejemplo, la red puede ser una estructura de árbol con solo un quemador. Sin embargo con un apropiado simulador de redes de tubería (Costa et al.⁽²⁰⁾, 1998), el algoritmo propuesto puede ser extendido a diversos tipos de estructuras de redes (ejemplo, redes cíclicas).

3.1.3.2. Método de Optimización.

El método propuesto esta basado en la aplicación de un AG para la optimización del diseño de redes de relevo. La adaptación de un AG para la resolución de este problema emplea los conocimientos del comportamiento del sistema en orden para garantizar un mejor funcionamiento. Las pruebas empíricas también permitieron establecer los pasos adicionales que trajeron aumentos del funcionamiento. La estructura principal del método esta representada en la figura 3.3.

3.1.3.2.1. Codificación.

Los caracteres son números enteros: una lista de los diámetros comerciales disponibles ordenados en tamaño están asociados a una secuencia de números enteros. Cada alternativa de solución esta representada por una cadena donde cada posición corresponde a una unión específica.

- 1) Start (Inicio)
Define el número máximo de generaciones : **Ngen**
Inicializar contador: = 0
- 2) Generación de la población inicial: **oldpop**
- 3) Evaluación de la adaptación
- 4) Seleccionar la subpoblación reproductiva: **reppop**
- 5) Escalamiento de la aptitud (Fitness scaling)
- 6) Operadores genéticos
 - 6.1) Reproducción
Selección de dos cadenas de reppop: **i_A y i_B**
 - 6.2) Cruzamiento y mutación
Generación de dos nuevas cadenas: **i_A^{new} y i_B^{new}**
 - 6.3) **newpop: = newpop \cup { i_A^{new} y i_B^{new} }**
- 7) Si newpop esta completa entonces ir a 8 si no regresar al paso 6.
- 8) Oldpop: = newpop, newpop: = {}
y contador: = contador + 1
- 9) Si contador: = Ngen entonces termina si no regresa a 3.

Figura 3.3. Pasos del algoritmo genético.

3.1.3.2.2. Evaluación de aptitud.

Las aptitudes de una cadena incluyen el costo de la red y una medida de la violación de las restricciones de caída de presión:

$$F = \frac{1}{C(d_1, d_2, \dots, d_s) + r \cdot \max \text{viol}} \quad (3.46)$$

Donde C es el costo de la red (ecuación 3.1), r es el peso de la penalidad y maxviol corresponde al máximo valor de violaciones a la restricción a lo largo de la red:

$$\max \text{viol} = \max_{\{t\}} \left[\max \left(0, \sum_{k \in Q_t} \frac{K_k (L_k + Le_k)}{d_k^{4.818}} - b_t \right) \right] \quad (3.47)$$

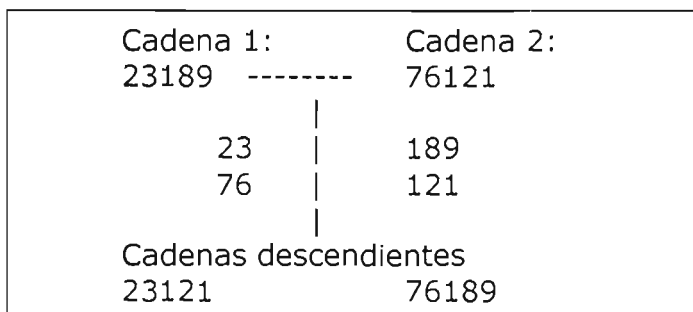


Figura 3.4. Un punto de cruzamiento (Ejemplo una cadena de cinco caracteres)

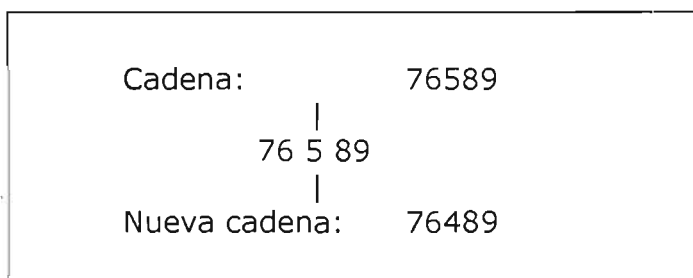


Figura 3.5. Mutación (Ej. Cadena de cinco caracteres)

3.1.3.2.3. Población inicial.

Los AGs comienzan con una población inicial creada por dos diferentes caminos: 90% de las cadenas son generadas al azar y el 10 % restante esta compuesto por cadenas integralmente formadas por caracteres asociados a grandes diámetros. La introducción de estas cadenas dirige a las primeras generaciones hacia la región factible.

3.1.3.2.4. Reproducción.

En una población de I cadenas, la probabilidad $(p_{rep})_i$ de que una cadena i sea elegida para la reproducción en cada selección individual es:

$$(p_{rep})_i = F_i / \sum_{j=1}^I F_j \tag{3.48}$$

3.1.3.2.5. Cruzamiento.

El algoritmo propuesto emplea el cruzamiento en un punto como según lo ilustrado en la figura 3.4 el punto de cruzamiento es seleccionado aleatoriamente. La probabilidad de aplicación de un operador de cruzamiento a un par de cadenas seleccionadas para reproducción esta dada por p_c , ejemplo

para $z \in [0,1]$ sea un número uniformemente distribuido al azar, si $z \leq p_c$ entonces el cruzamiento es aplicado, de otra manera las cadenas permanecen intactas.

3.1.3.2.6. Mutación.

La probabilidad de mutación para cada cadena de caracteres es p_m . El operador de mutación es aplicado a través de una alteración aleatoria del carácter como sigue. Considere otro número aleatorio $z \in [0,1]$, si $z \leq p_d$ entonces el carácter actual es substituido por el carácter asignado al diámetro inmediatamente inferior en una lista de diámetros disponibles, de otra forma éste es substituido por el carácter asignado al diámetro inmediatamente superior en la lista. La figura 3.5 ilustra este proceso.

En un AG convencional, los movimientos de mutación son puramente aleatorios. De acuerdo con este concepto, la probabilidad p_d puede asumir un valor igual a 0.5.

Sin embargo, el comportamiento de este problema particular de optimización establece que bajos diámetros están asociados a costos bajos. Por lo tanto, esto se adopta como una regla heurística que *predispone la mutación* hacia diámetros más bajos ($p_d \geq 0.5$). Esta regla fue aplicada por Dandy et al⁽¹⁸⁾ (1996) para la optimización de sistemas de distribución de agua.

3.1.3.2.7. Escalamiento de la Aptitud.

Como el número de generaciones se incrementa, las aptitudes promedio de las cadenas en una población también se incrementan y la diferencia relativa entre las aptitudes decrece. Si esta diferencia relativa de las aptitudes se hace muy pequeña, el operador de reproducción cambia a una selección de cadenas aleatoria, por ejemplo no hay recompensa por los mejores individuos en la reproducción. Este hecho puede causar una gran reducción en la velocidad de evolución de un AG. Para evitar este obstáculo, el escalamiento de la aptitud acentúa las diferencias de las aptitudes entre individuos en una población.

El criterio de escalamiento adoptado en este trabajo esta basado en el escalamiento lineal presentado en Goldberg⁽²⁴⁾ (1989). Considera un conjunto de I individuos con aptitudes originales F_i ($i = 1, \dots, I$).

La aptitud escalada F_i^{scale} esta dada por:

$$F_i^{scale} = \frac{(\delta - 1)F_{avg}}{(F_{max} - F_{avg})} F_i + \frac{F_{avg} (F_{max} - \delta F_{avg})}{(F_{max} - F_{avg})} \quad (3.49)$$

donde $F_{\max} = \max\{F_i\}$, $F_{\min} = \min\{F_i\}$, $F_{\text{avg}} = \sum F_i / I$ y δ es el parámetro que controla la intensidad de escalamiento. Los valores negativos de aptitudes escaladas se fijan en cero: si $F_i^{\text{scale}} < 0$ entonces $F_i^{\text{scale}} = 0$.

3.1.3.2.8. Subpoblación reproductiva.

Definimos el concepto de subpoblación reproductiva para intensificar la presión selectiva en la población, para incrementar la eficiencia del proceso de búsqueda. Para cada generación, antes de la aplicación del escalamiento de aptitud y operadores genéticos, las cadenas en una población, son listadas en orden decreciente de aptitud. De la población entera (I cadenas), se establece una subpoblación que contiene las $I \cdot \text{frep}$ cadenas con altas aptitudes, es decir, los $I \cdot \text{frep}$ individuos mejores, donde frep es un factor previamente especificado. Solo las cadenas presentes en esta subpoblación participaran en el subsiguiente proceso de reproducción-cruzamiento-mutación para originar las I nuevas cadenas para la siguiente generación.

3.1.3.3. Resultados Obtenidos.

3.1.3.3.1. Predisposición a la Mutación.

La influencia de la predisposición a la mutación fue investigada a través de dos conjuntos de 10 corridas. En el primer conjunto corrido, el procedimiento de optimización fue usado mediante la predisposición a mutación ($p_d \geq 0.65$) y en el segundo conjunto corrido, fue empleada la mutación puramente aleatoria ($p_d \geq 0.5$). En ambos casos, los parámetros utilizados del AG fueron: tamaño de población: $I = 30$, probabilidad de cruzamiento: $p_c = 0.90$, probabilidad de mutación: $p_m = 0.03$. El peso de la penalidad para el escalamiento de aptitud fue $r = 2 \cdot 10^{-8} \text{ } \$ / \text{Pa}^2$. El escalamiento de aptitud o la subpoblación reproductiva no fue incluida en este análisis. Cada corrida fue conducida a través de 1,000 generaciones sucesivas. La mutación puramente aleatoria alcanzo una función objetivo mayor que cuando se usó predeterminación a la mutación. Puede notarse que solo por medio del cambio de las características de la mutación ($p_d \geq 0.5 \rightarrow p_d \geq 0.65$) y sin esfuerzo de cómputo adicional, hubo una reducción del 12% en la función objetivo promedio para las 10 corridas. Otras corridas usando valores mayores de p_d causan un cambio excesivo de caracteres hacia diámetros más bajos. Por lo tanto, como el número de generaciones incremento, las poblaciones fueron dominadas por cadenas no factibles con valores bajos de aptitud.

3.1.3.3.2. El escalamiento de Aptitud y la Subpoblación Reproductiva.

Pruebas empíricas indicaron que el escalamiento de aptitud y la subpoblación reproductiva pueden implicar un gran incremento del desarrollo del AG para el problema analizado.

El algoritmo propuesto fue aplicado en 100 corridas conducidas a través de 500 generaciones. Los parámetros del AG empleados fueron los mismos de la subsección anterior ($I=30$, $p_c = 0.90$, $p_m = 0.03$, $p_d = 0.5$ y $r = 2 \cdot 10^{-8}$ \$/Pa²). El factor f_{rep} usado en la selección de la subpoblación reproductiva fue igual a 0.4 y el parámetro δ usado para el control de escalamiento fue igual a 5. La función objetivo promedio en las soluciones es considerablemente más pequeño e involucra esfuerzos computacionales muy bajos cuando comparamos los resultados presentados en la subsección anterior.

La utilización del escalamiento de la aptitud y la subpoblación reproductiva se debe hacer cuidadosamente porque la presión selectiva intensa en primeras generaciones de un AG puede causar convergencia prematura a un óptimo local pobre. En este caso, ocurre un rápido dominio de la población por cadenas mediocres. Sin embargo, para un conjunto de 100 corridas analizadas, este hecho ocurre solamente una vez.

El escalamiento de las aptitudes y la subpoblación reproductiva propuestos son empleados para incrementar la presión selectiva en el operador de reproducción. La predisposición a la mutación dio mejores resultados que la mutación puramente aleatoria. El escalamiento de aptitudes, y la subpoblación reproductiva permiten una considerable mejora en funcionamiento del AG.

3.1.4. Comentarios.

Los planteamientos anteriormente presentados para realizar la optimización del diseño de redes de tubería del SRP parten de una misma función objetivo que busca minimizar el costo total de la red de tubería mediante la reducción de los diámetros de cada sección que la componen, garantizando que cumplan con las restricciones de máxima caída de presión en las trayectorias de las válvulas al quemador. La diferencia radica en la formulación problema para la optimización.

Murtagh⁽⁴¹⁾ (1972) aproximó el problema de diseño óptimo de redes de relevo de presión como un problema de programación no lineal (PNL) el cual es resuelto a través del problema dual correspondiente. Los diámetros fueron considerados variables continuas y se tienen que ajustar posteriormente con lo que la función objetivo se incrementa. Por otra parte, Costa et al ⁽¹⁹⁾ (2000) propusieron una formulación alternativa usando segmentos de longitud de

tubería teniendo diferentes diámetros discretos como variables de decisión. El problema resultante es un problema de programación lineal (PL), en donde la solución obtenida necesita un postratamiento ya que puede haber secciones de tuberías relativamente pequeñas, con lo que la función objetivo también se incrementa ligeramente.

Finalmente la formulación que presentan Costa et al.⁽¹⁸⁾(1999) para la solución del problema de optimización de la red mediante algoritmos genéticos presenta resultados muy aceptables mejorando los obtenidos por Murtagh, este planteamiento resulta de gran interés debido a que presenta un modo de solución mas o menos sencilla, cabe mencionar que este planteamiento utiliza la estructura original del problema, es decir de tipo de programación no lineal, y no requiere transformación de variables, además de que utiliza diámetros discretos de una de lista diámetros comerciales, como se hace en el planteamiento de programación lineal.

Los algoritmos genéticos como se vio en el capitulo anterior presentan grandes ventajas que facilitan la solución de problemas que, mediante otros métodos convencionales son muy difíciles o bien no pueden ser resueltos. Otra característica que poseen los AGs es que permiten que la solución al problema no quede atrapada en óptimos locales debido a que le permite cambiar totalmente de región de búsqueda dentro de la región factible del problema, esta característica se la confiere el operador de mutación, por ello puede considerarse como un método de optimización global.

Es importante mencionar de igual forma que, si bien los algoritmos genéticos pueden tener ventajas de gran consideración, también presentan desventajas, pero a pesar de ello obtienen soluciones bastante aceptables aunque no garantizan obtener la solución óptima, y no por ello quiere decir que no la puedan encontrar.

Las ventajas que presentan los algoritmos genéticos fueron el motivo por el cual se eligió este tipo de método para obtener la solución del problema de optimización de la red de tuberías del sistema de relevo de presión, aplicado específicamente a la red de tuberías de la planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización ubicada en la Refinería de Minatitlán, Veracruz, que es el objetivo principal de este trabajo.

3.2. Algoritmo para el dimensionamiento de la Red de Tubería del SRP.

Para realizar el dimensionamiento del SRP se presenta en la figura 3.6 un diagrama de bloques con los pasos que deben seguirse, dentro de este diagrama encontramos un paso que se refiere al dimensionamiento de la red de tubería el cual forma parte del objetivo de este trabajo. En la figura 3.7 se

presenta el diagrama de bloques que muestra los pasos que se realizan en el dimensionamiento de la red de tubería del SRP.

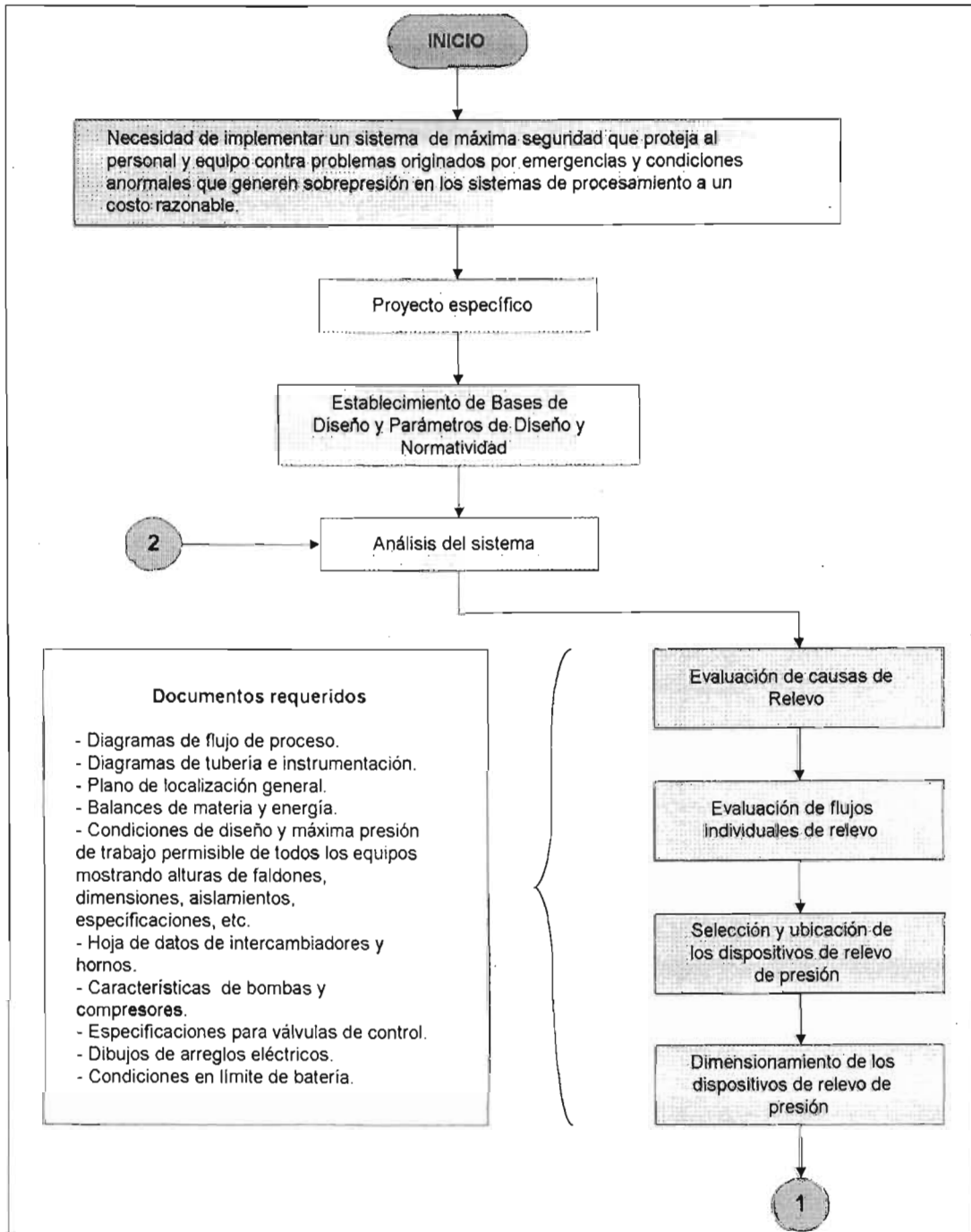


Figura 3.6. Metodología para el diseño del SRP.

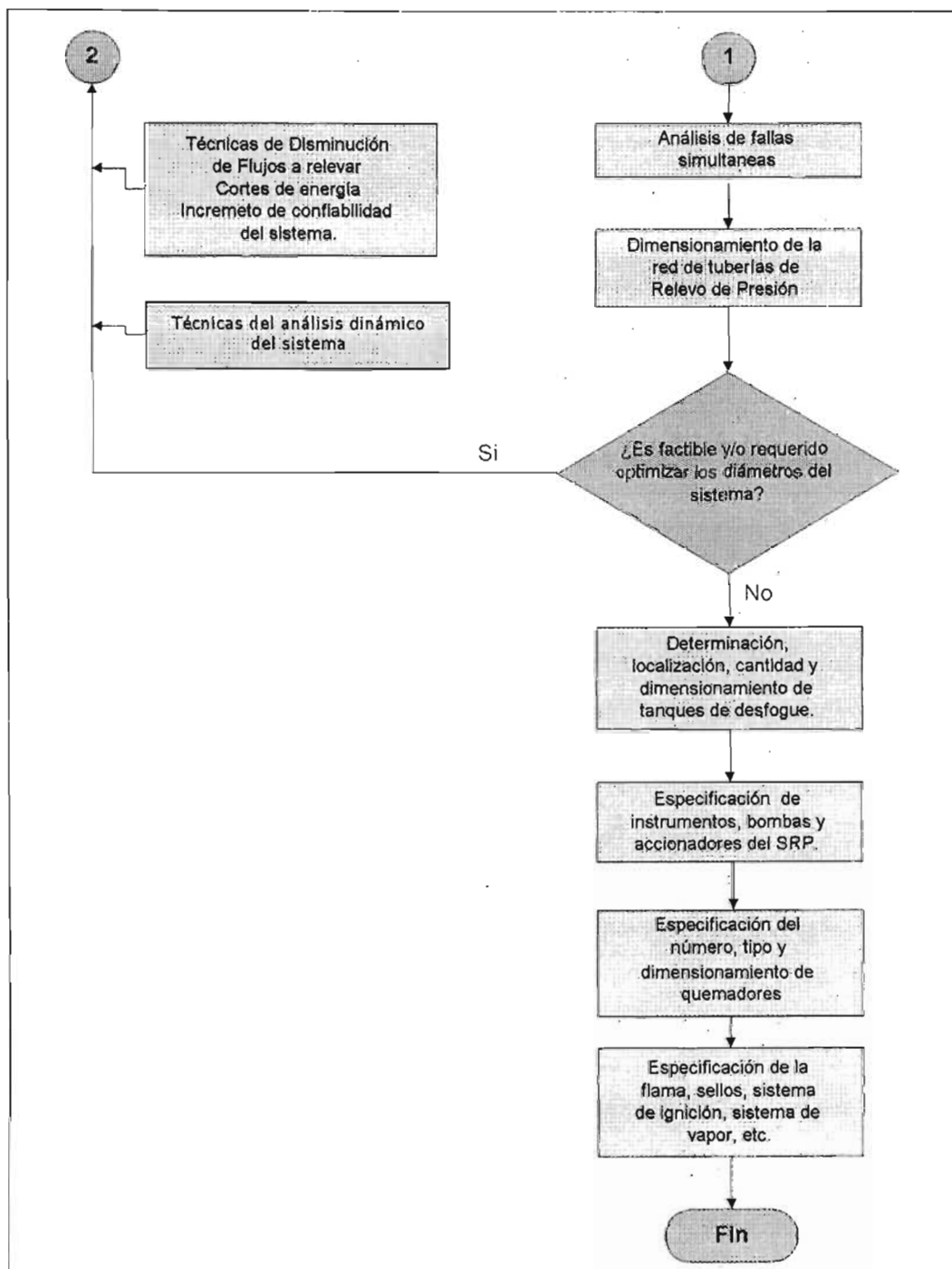


Figura 3.6. Metodología para el diseño del SRP (Continuación).

A continuación se desarrollan los pasos que se presentan para el dimensionamiento de la red de tubería del sistema de relevo de presión, es decir el algoritmo de cálculo.

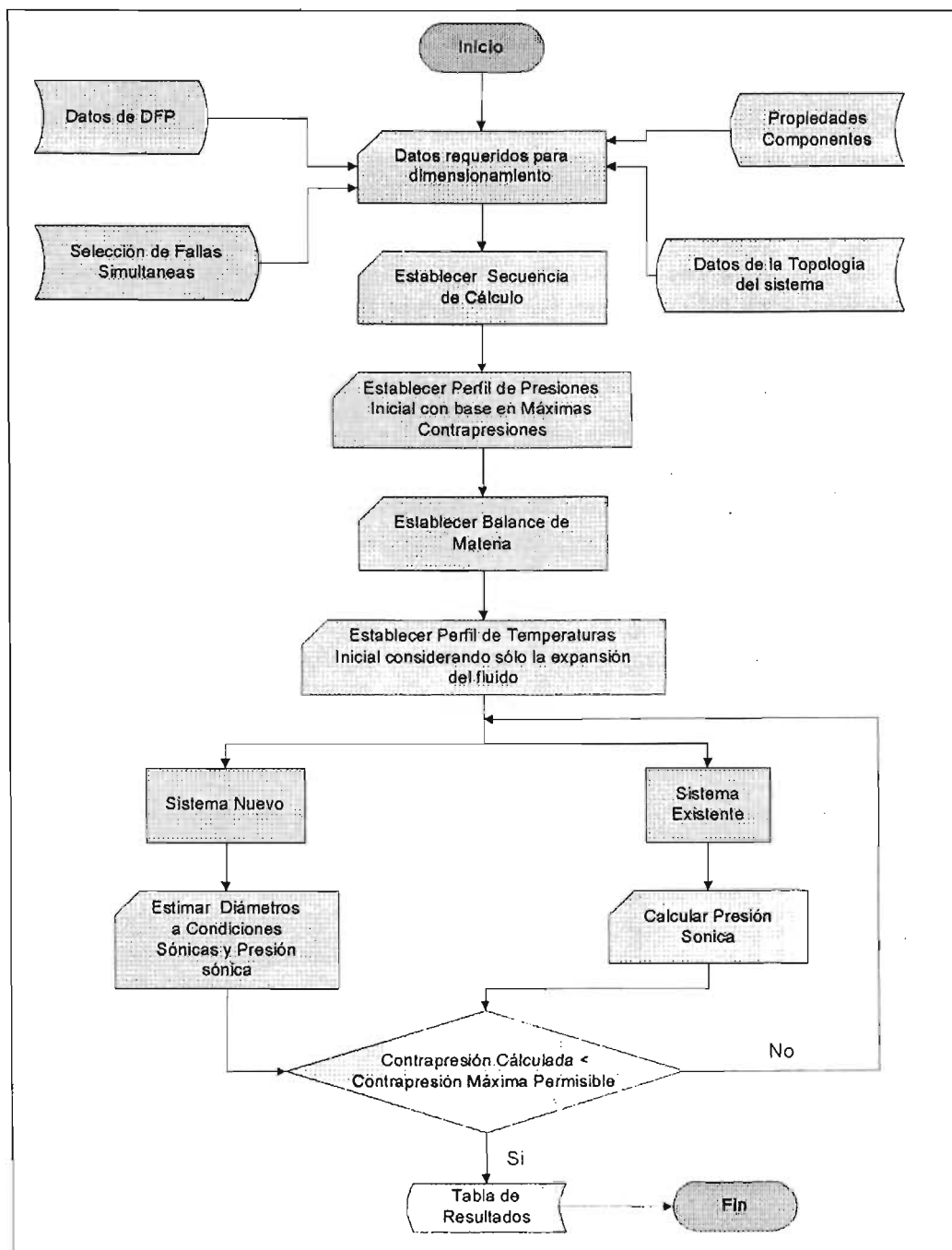


Figura 3.7. Metodología para el dimensionamiento del cabezal del SRP.

3.2.1. Secuencia de cálculo en redes de SRP.

Como ya se mencionó, el sistema de relevo de presión consiste en una red de tuberías que alivian la presión en sistemas específicos, ya sea en forma independiente o simultáneamente.

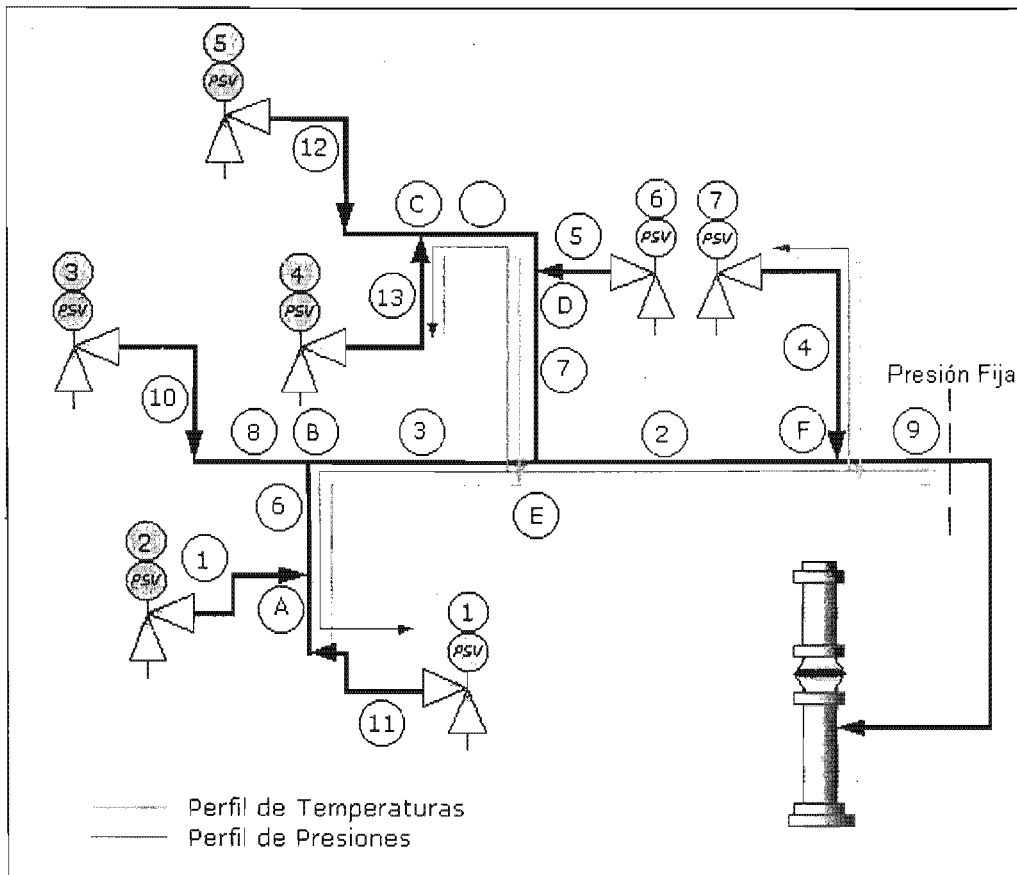


Figura 3.8. Red de un Sistema de Relievo de Presión.

En la figura 3.8, se asume que después de un análisis de fallas en la planta; se establece que existen cuatro posibles fallas en el sistema de acuerdo a la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Ejemplo de fallas en un Sistema de Relievo de Presión.

Válvula de Seguridad	Fallas				Observaciones
	Fuego	Energía Eléctrica	Descarga Bloqueada	Check	
PSV-1					Área de Fuego Común I
PSV-2					
PSV-3					Área de Fuego Común II
PSV-4					
PSV-5					
PSV-6					
PSV-7					

Para la evaluación del perfil de presiones se considera que existe una presión conocida al final de la red de tuberías, ya sea en el tanque de desfogue, en el quemador, en el límite de batería de la planta, etc., la cual permanece fija y es la base de cálculo del sistema. En función de ello se establece la evaluación de la contrapresión del sistema con base en un diámetro determinado, el cual inicialmente se considera como el diámetro a condiciones sónicas para sistemas nuevos y el existente para sistemas en operación; lo anterior se muestra en la figura 3.8.

Se considerarán como "sistemas" a los tramos simples de tubería que no están conectados directamente a una válvula de seguridad y se designarán como "dispositivos" a aquellos tramos de tubería unidos directamente a una válvula de seguridad; debido a que se conoce originalmente el arreglo de la red de tuberías y su conformación; se consideran los siguientes criterios para establecer la secuencia u orden de cálculo⁽³¹⁾ para una determinada falla:

1. Se inicia la secuencia de cálculo en el sistema al cual se le haya designado el punto de presión fija.
2. Se verifican que sistemas concurren en el elemento inicial, en el caso de que alguno de éstos sea un dispositivo, se evalúa en primera instancia, si existen dos o más elementos se selecciona uno de ellos y se mantiene pendiente el restante; el cual es preservado temporalmente en un vector.
3. Una vez seleccionado el elemento se repite el procedimiento señalado en (2), para el siguiente elemento.
4. Cuando a un sistema concurren únicamente válvulas, se evalúan éstas y se considera concluida esa trayectoria; enseguida se procede a evaluar los sistemas pendientes.

Para la evaluación del perfil de temperaturas⁽³⁰⁾ se determina con base en la temperatura en los puntos iniciales, es decir en la descarga de cada válvula de seguridad, tal y como se indica en la figura 3.8.

Adicional al perfil de presiones se consideran los puntos de unión en la red los cuales se denominan "nodos" y son aquellos en los cuales se unen dos sistemas y de los cuales se genera uno nuevo.

De acuerdo a ello y considerando la figura 3.8 y la tabla 3.1; a continuación se establece la secuencia de cálculo para cada falla determinada originalmente.

Tabla 3.2. Secuencia de cálculo.

Válvulas a relevar	Falla	Secuencia de cálculo en perfil de presiones	Secuencia de cálculo en perfil de temperaturas	Nodos (unión de Sistemas)
PSV-1, PSV-2, PSV-3	Fuego área I	9-2-5-8-10-6-1-11	11-1-6-10-8-5-2-9	A(1,11) B(8,6)
PSV-4, PSV-5	Fuego área II	9-2-7-14-13-12	12-13-14-7-2-9	C(12,13)
PSV-1, PSV-4, PSV-7	Energía eléctrica	9-4-2-7-14-13-5-6-11	11-6-5-13-14-7-2-4-9	E(7,5)
PSV-2	Descarga Bloqueada	9-2-5-6-1	1-6-5-2-9	S/N
PSV-6	Descarga Bloqueada	9-2-7-3	3-7-2-9	S/N
PSV-4	Válvula check	9-2-7-14-13	13-14-7-2-9	S/N

3.2.2. Balance de Materia y Energía del SRP.

Una vez establecida la secuencia de cálculo; se pueden desarrollar los balances de materia y energía en los puntos de convergencia denominados nodos, y en los tramos y secciones de tubería con información proporcionada por las corrientes individuales de las cuales ya se han obtenido las propiedades termodinámicas y físicas iniciales para el sistema.

En los nodos se obtienen las propiedades de la mezcla de corrientes con base en las ecuaciones indicadas en la sección 3.2.2.1. Una vez obtenidas las propiedades en un nodo inicial determinado, lo cual constituye la parte inicial de un sistema en particular.

3.2.2.1. Evaluación de Propiedades en Mezclas de Corrientes⁽⁴⁶⁾.

En los nodos de la red (puntos de interconexión de dos sistemas); al mezclarse dos o más corrientes, las propiedades medias de la mezcla se evalúan de la siguiente manera:

3.2.2.1.1. Flujo másico⁽⁴⁸⁾.

$$W_{mezcla} = \sum_{i=1}^N W_i \quad (3.50)$$

3.2.2.1.2. Flujo molar total⁽⁴⁸⁾.

$$N_{mezcla} = \sum_{i=1}^N \frac{W_i}{PM_i} \quad (3.51)$$

3.2.2.1.3. Peso Molecular ^(48, 31).

$$M_{mezcla} = \frac{\sum_{i=1}^N PM_i \left(\frac{W_i}{PM_i} \right)}{N_{mezcla}} \quad (3.52)$$

3.2.2.1.4. Capacidad calorífica ^(48, 31).

$$Cp_{mezcla} = \frac{\sum_{i=1}^N Cp_i \left(\frac{W_i}{PM_i} \right)}{N_{mezcla}} \quad (3.53)$$

3.2.2.1.5. Relación de Calores específicos ^(48, 31).

$$\frac{Cp}{Cv}_{mezcla} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Cp}{Cv} \right)_i \left(\frac{W_i}{PM_i} \right)}{N_{mezcla}} \quad (3.54)$$

3.2.2.1.6. Presión crítica. ^(48, 31)

$$Pc_{mezcla} = \frac{\sum_{i=1}^N Pc_i \left(\frac{W_i}{PM_i} \right)}{N_{mezcla}} \quad (3.55)$$

3.2.2.1.7. Temperatura crítica. ⁽⁴⁸⁾

$$Tc_{mezcla} = \frac{\sum_{i=1}^N Tc_i \left(\frac{W_i}{PM_i} \right)}{N_{mezcla}} \quad (3.56)$$

3.2.2.1.8. Entalpía. ⁽⁴⁸⁾

$$H_{mezcla} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i \left(\frac{W_i}{PM_i} \right)}{N_{mezcla}} \quad (3.57)$$

3.2.2.1.9. Entropía. ⁽⁴⁸⁾

$$S_{mezcla} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i \left(\frac{W_i}{PM_i} \right)}{N_{mezcla}} \quad (3.58)$$

3.2.2.1.10. Fracción molar. ^(48, 31)

$$y_{i\text{mezcla}} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \left(\frac{W_i}{PM_i} \right)}{N_{mezcla}} \quad (3.59)$$

3.2.2.1.11. Viscosidad. ⁽⁴⁷⁾

La viscosidad en cada nodo o punto de interconexión, se desarrolla mediante el método propuesto por Wilke.

Método de Wilke⁽⁴⁷⁾.

Como una mejora de la teoría cinética, Wilke propone las siguientes ecuaciones:

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n y_j \phi_{ij}} \quad (3.58.1)$$

En donde:

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1.0 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{0.5} (PM_j PM_i)^{0.25} \right]^2}{\left[8.0 \left(1.0 + \frac{PM_i}{PM_j} \right) \right]^{0.5}} \quad (3.58.2)$$

$$\phi_{ii} = 1.0$$

$$\phi_{ji} = \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right) \frac{PM_i}{PM_j} \phi_{ij} \quad (3.58.3)$$

3.2.3. Establecer Perfil de Temperaturas.

3.2.3.1. Evaluación de la expansión isoentálpica de un fluido compresible. (Cálculos con el coeficiente de Joule-Thompson constante).

Para llevar el cálculo de la temperatura del fluido a relevar debido a la expansión considerando la entalpía constante hacemos uso de la ecuación:

$$T_2 = T_1 - \mu_T (P_1 - P_2) \quad (3.59)$$

Donde:

μ_T Es el coeficiente de Joule – Thompson.

T_1, T_2 Temperatura antes y después de la expansión del fluido respectivamente.

P_1, P_2 Presión antes y después de la expansión del fluido respectivamente.

Evaluación de la expansión isentrópica de un fluido compresible.

Para evaluar la temperatura de un fluido después de la expansión considerando la entropía constante utilizamos la siguiente ecuación:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.60)$$

Donde:

k Es la relación C_p/C_v .

T_1, T_2 Temperatura antes y después de la expansión del fluido respectivamente.

P_1, P_2 Presión antes y después de la expansión del fluido respectivamente.

Determinación de la temperatura resultante de la mezcla de corrientes.

La determinación de la temperatura de mezcla nos permite calcular la temperatura en los nodos localizados dentro de la red de tubería del SRP y se calcula mediante la siguiente expresión.

$$T_{mezcla} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{p_i} W_i T_i}{W_{mezcla} C_{p_{mezcla}}} \quad (3.61)$$

3.2.4. Perfil de Presiones y Evaluación de diámetros.

3.2.4.1. Evaluación de caídas de presión en redes de tuberías que manejan fluidos compresibles. ^(35, 36)

El diseño de los cabezales y ramales de descarga de dispositivos de relevo de presión involucra considerar; la distribución y arreglo de los equipos en la planta, el proceso, la máxima descarga de flujo simultánea en los cabezales, el tipo de dispositivo de relevo empleado, la máxima caída de presión permisible en los cabezales y el método matemático para el cálculo de la caída de presión de tal manera que se pueda establecer el dimensionamiento adecuado de los cabezales y ramales del sistema.

Cuando los aspectos anteriormente enunciados se han definido, la selección de los diámetros correspondientes del sistema se reduce a cálculo de flujo de fluidos.

El flujo de fluidos en tuberías esta siempre acompañado de rozamiento de partículas del fluido entre sí, y consecuentemente, por la pérdida de energía disponible; en otras palabras, tiene que existir una pérdida de presión en el sentido del flujo. La ecuación general de la pérdida de presión, es conocida como fórmula de Darcy la cual se definió en el Capitulo 1 ecuación 1.17.1.

Por otra parte para determinar el coeficiente de fricción necesario para evaluar las pérdidas de fricción, este se calcula en función del número de Reynolds (ecuación 1.18), para ello se han desarrollado diversas ecuaciones para poder evaluarlo entre las que se encuentran la ecuación de Fanny (Regimén de flujo laminar $Re < 2000$ ecuación 1.19), ecuación de Colebrook (Flujo Turbulento ecuación 1.20).

El paso siguiente para determinar la caída de presión en cada sistema de la red es el cálculo del diámetro, para ello se hace uso de la condiciones sónicas (ecuaciones 1.11 y 1.12), es decir, la velocidad y presión sónica.

Una vez estimado el diámetro, se procede a calcular la caída de presión en cada sistema mediante la ecuación a régimen isotérmico es decir la ecuación de Conison presentada en el capitulo 1 (ecuación 1.24), la cual utiliza las condiciones a la salida del sistema y evalúa la presión inicial del sistema.

A continuación se evalúa la contrapresión en el sistema y se compara con la contrapresión máxima permitida en el sistema, si esta es menor se termina el cálculo, si por el contrario, esta resulta ser mayor, se regresa al punto donde se estiman los diámetros, y se procede a realizar nuevamente el calculo con un nuevo diámetro mayor al propuesto.

Esto se realiza para cada secuencia hasta encontrar todos los diámetros de cada sección de la red.

Este algoritmo será implementado en la optimización del cabezal y ramales que componen la red de tuberías del sistema de relevo de presión de la planta de Hidrodesulfurización de Naftas de coquización que es el problema particular tratado en este trabajo.

CAPÍTULO 4. ASPECTOS CONSIDERADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE TUBERÍA DEL SRP DE LA PLANTA HDS DE NAFTAS.

En el presente capítulo se presenta los antecedentes generales del caso de estudio y aplicación para el Sistema propuesto empleando el AG que se requieren para poder realizar el cálculo del dimensionamiento de la red de tuberías del SRP de la planta HDS de Naftas, por tanto, es necesario conocer la forma en que opera la planta, por ello se incluye en esta parte la descripción del proceso de la planta HDS además otros aspectos considerados en esta sección son los puntos críticos del proceso, la configuración del SRP mostrando los cabezales que lo conforman así como las características particulares de las válvulas de relevo que los conforman.

4.1. Descripción del Proceso de la Planta HDS de Naftas.

4.1.1. Introducción.

La Planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización⁽³²⁾ que se ha seleccionado como caso de estudio para el proyecto actual, se encuentra en la Refinería "Lázaro Cárdenas" en Minatitlán, Veracruz y funciona de acuerdo al siguiente esquema (información de integración).

La planta está diseñada para procesar una corriente de nafta que proviene de la Planta de Coquización Retardada, o de almacenamiento. La planta HDS cuenta con un tanque de balance y con las instalaciones necesarias para recibir esta corriente.

El propósito de la planta HDS es eliminar compuestos indeseables presentes en la carga, entre los que se encuentran principalmente diolefinas, sílice, olefinas, azufre, y nitrógeno, mediante procesos de hidrogenación catalítica, separación y tratamiento para obtener como productos principales una corriente de nafta pesada la cual se enviará como carga a las Plantas de Reformación de Naftas, así como una corriente de nafta ligera compuesta básicamente por pentanos y hexanos que se envía normalmente como carga a la Planta Isomerizadora de Pentanos-Hexanos.

La planta se conforma por tres secciones: Sección de Reacción, Sección de Fraccionamiento y Sección de Regeneración de Amina, las cuales se describen a continuación.

4.1.2. Sección de Reacción.

En esta sección se realizan las reacciones de hidrogenación catalítica de los compuestos de diolefinas, olefinas, sílice, azufre y nitrógeno presentes en la

Corriente de carga a la planta. Ver los diagramas de flujo de proceso DFP-01, DFP-02 y DFP-03 que se muestran en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente.

La corriente de alimentación previo paso a través del filtro de carga, PF-1001 A/B, es recibida a control de nivel en el tanque de carga D-1001 el cual cuenta con una plerna separadora para eliminar el agua amarga que pudiera traer consigo la corriente de alimentación, enviándose ésta a control de nivel de interfase al tanque de aguas amargas, D-1017. Por otra parte, la nafta se envía mediante la bomba de carga, P-1001/R(T), a control de flujo, previo mezclado a control de flujo con una corriente de hidrógeno que procede de la descarga del compresor de hidrógeno de recirculación C-1002 (T) hacia el interenfriador del reactor de saturación de olefinas E-1101, posteriormente llega al segundo intercambiador carga/efluente del reactor, E-1002 donde se precalienta hasta una temperatura de 180 °C temperatura a la cual se envía como carga al reactor de saturación de diolefinas R-1001 donde se lleva a cabo la saturación total de las diolefinas presentes en la nafta en un intervalo de temperatura entre 180 y 200 °C y presiones del orden de los 64 a los 66.5 kg/cm² man.

El reactor operará con una relación Hidrógeno - Hidrocarburo de 350 ft³ std de H₂ puro por barril de carga y con un consumo de 150 ft³ std de H₂ puro por barril de carga y un espacio velocidad de 2.0 hr⁻¹.

La temperatura de reacción es controlada mediante la salida de una corriente de nafta al interenfriador E-1101 y su posterior retorno al reactor R-1001.

Las reacciones de saturaciones de olefinas son altamente exotérmicas por ello, se espera un incremento de temperatura en la salida del reactor de 36 °C.

El efluente del reactor R-1001, libre de diolefinas, se mezcla con el hidrógeno de recirculación mediante un relacionador de flujo con la finalidad de mantener una relación hidrógeno-hidrocarburo constante en el proceso, por lo que al mezclarse con hidrógeno la temperatura desciende de 216 °C hasta 179 °C, posteriormente se precalienta en el primer intercambiador carga/efluente del reactor, E-1004 A/D con lo cual se eleva la temperatura de la carga hasta 233 °C a esta temperatura la vaporización de la mezcla amarga es del 67.3 % mol; sin embargo como las reacciones de remoción de sílice se dan en fase gas totalmente es necesario calentar aún más la mezcla por lo que se envía hacia el calentador de carga, H-1001, que es un calentador a fuego directo, en donde se vaporiza totalmente la mezcla a una temperatura de 250 °C, temperatura a la cual ingresa la mezcla a las guardas de sílice R-1003 A/B; en este reactor se elimina los componentes de silicio (sílice) presentes en la nafta de carga, a medida que desciende el hidrocarburo a lo largo del reactor la sílice se absorbe en la superficie del catalizador.

Los parámetros operativos para la remoción de la sílice en el reactor son una relación hidrogeno-hidrocarburo de 2846 ft³ std de H₂ puro por barril de carga y una temperatura que debe mantenerse en el rango de 250-260°C para que la nafta se encuentre en fase gaseosa, con una presión de operación entre 56.8 y 57.8 kg/cm² man. El reactor tiene dos lechos y para controlar el calor de reacción entre ambos lechos se inyecta nafta dulce de apagado a control de temperatura en cascada con control de flujo.

El efluente de las guardas de sílice, se envía como carga al reactor de Hidrodesulfuración R-1002 previo mezclado con una corriente de hidrogeno a control de flujo para mantener la relación hidrogeno-hidrocarburo de 3991 ft³ std de H₂ puro por barril de carga y un consumo de 150 ft³ std de H₂ puro por barril de carga, teniéndose una temperatura de alimentación al reactor de 290 °C y una presión de 54.8 kg/cm² man. El reactor esta compuesto por dos lechos fijos de catalizador llevándose en él la eliminación de los compuestos de azufre, nitrógeno y la saturación de olefinas, mediante reacciones de hidrogenación catalítica, las cuales son altamente exotérmicas por lo que se considera un incremento de temperaturas a la salida del reactor.

Debido a la alta generación de calor se alcanzan incrementos grandes de temperatura en los lechos que afectan el proceso de remoción de azufre y favorece las reacciones de reconversión, afectando directamente la calidad del producto, por lo que resulta importante regular la temperatura de alimentación al lecho inferior del reactor de hidrodesulfuración R-1002. Para ello, se realiza el apagado entre ambos lechos con nafta pesada dulce proveniente de la torre separadora de naftas. La inyección de nafta dulce de apagado se realiza entre los lechos a control de temperatura en cascada con control de flujo.

El efluente del Reactor R-1002 se mantiene para inicio de corrida a 310 °C y 52.8kg/cm² man. esta corriente caliente ya hidrodesulfurada se envía a precalentar la carga al primer intercambiador carga/efluente del reactor E-1004 A/D , con esto el efluente de reacción se enfría hasta 244 °C a esta temperatura la corriente se envía nuevamente a precalentar la carga al segundo intercambiador carga/efluente del reactor E-1002 de donde sale a 219 °C Y 51.2 kg/cm² man. Para ajustar la distribución de calor de la corriente efluente del reactor existe una corriente de desvío a control de temperatura, en el cambiador E-1002, que regula la temperatura de alimentación al reactor de saturación de diolefinas. Posteriormente el efluente entra en el Enfriador del efluente del reactor de hidrodesulfuración EA-1009 para ser recibido en el tanque separador caliente de los productos del reactor D-1002; a partir de este tanque se obtienen dos corrientes; la corriente constituida por la fase liquida se envía a control de nivel del mismo tanque hacia la Sección de Fraccionamiento, la corriente en fase gas constituida principalmente por hidrógeno e hidrocarburos ligeros se envía al primer enfriador de nafta del separador caliente EA-1001 previo mezclado a control de flujo con una corriente de agua de lavado, continuándose en el EA-1001 la condensación del

hidrocarburo y por lo tanto la formación de sales de amonio razón por la cual se inyecta en una proporción de 3.5 gal/barril de carga agua de lavado cuya finalidad es barrer la posible formación de sales amonio y cloruros y evitar así taponamientos en el circuito.

En el punto de inyección de agua de lavado también se inyecta inhibidor de corrosión con la idea de minimizar el efecto del H₂S en el circuito.

A la salida del EA-1001 la corriente que esta a 55 °C se envía hacia el segundo enfriador de nafta del separador caliente E-1012 en donde se enfría hasta 43 °C para recibirse la mezcla en el tanque separador frío de los productos del reactor D-1011 a 49 kg/cm² man.

En el tanque D-1011 se separan tres fases: la fase líquida pesada consiste en agua amarga que se envía a control de nivel hacia el tanque de agua amarga D-1017; la segunda fase líquida es nafta fría que se envía hacia la sección de fraccionamiento a control de nivel del mismo tanque.; la tercera corriente constituida por la fase vapor rica en hidrógeno y H₂S (gas de recirculación) se envía como carga al fondo de la torre de lavado con amina T-1003 (torre de absorción), donde se le elimina el ácido sulfhídrico presente en el gas mediante un proceso de absorción con una solución de dietanolamina (DEA) al 20 % en peso .

El gas amargo entra por la parte inferior de la torre T-1003 y se pone en contacto directo en contracorriente con una solución de DEA pobre proveniente del tanque de amina pobre, TV-1001 de la Sección de Regeneración de Amina, la cual se alimenta por la parte superior mediante la bomba de amina pobre P-1015/R previa inyección de antiespumante; la amina pobre a medida que entra en contacto a contracorriente con el gas absorbe el ácido sulfhídrico, obteniéndose como productos de domos de la misma torre la fase gaseosa rica en hidrógeno con un contenido de H₂S de 16 ppm en peso mínimo y un máximo de 30 ppm en peso y por los fondos de la misma torre D-1003 la fase líquida (amina rica).

La corriente de amina rica se envía hacia la sección de endulzamiento a control de nivel de la misma torre D-1003.

El gas de recirculación rico en hidrógeno a partir de la torre T-1003 se recibe en el tanque de succión del compresor de hidrógeno de recirculación D-1003

A partir del tanque D-1003 de manera normal no se esperan líquidos, pero en caso de haberlos se envían a control de flujo hacia la línea de amina rica (interconexión después del control de nivel de la torre T-1003), en el caso de la fase gas constituida por el gas de recirculación, esta se envía como carga al compresor de hidrógeno de recirculación, C-1002 (T), el cual es accionado por

una turbina a condensación total, el compresor le eleva la presión al gas a la descarga hasta $71.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ man}$ y $107 \text{ }^\circ\text{C}$.

La presión de la sección de reacción se mantiene a través del control de presión instalado en la línea de purga en la línea de salida de gas del tanque D-1003, esta purga tiene la finalidad de evitar concentrar los componentes ligeros y normalmente se purga de un 3 a un 7 % del gas de reciclo, con la idea de aumentar la pureza de hidrógeno al gas de reciclo. Esta corriente de purga se envía a integrar a la Sección de Fraccionamiento

El hidrógeno de reposición procedente de la Planta de Hidrógeno a $35 \text{ kg/cm}^2 \text{ man}$ y 38°C se alimenta a control de flujo al tanque de succión del compresor de hidrógeno de reposición D-1009, y a partir del mismo, el gas es manejado por el compresor de hidrógeno de reposición, C-1001, el cual le aumenta la presión hasta $71.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ man}$ y $142 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para controlar el flujo de hidrógeno de reposición se cuenta con una línea de recirculación de la descarga del compresor al tanque de succión D-1009, acondicionando su temperatura con el enfriador de recirculación de hidrógeno de reposición, EA-1005 X.

El gas a alta presión a partir del compresor C-1001 se envía a mezclarse con la corriente de descarga del compresor de hidrógeno de recirculación C-1002 (T), esta mezcla se divide en 4 ramales: la primera se envía a mezclarse con la nafta amarga después del control de flujo localizado a la descarga de la bomba de carga P-1001/RT con la cual se mantiene la relación $\text{H}_2\text{-HC}$ al reactor de saturación de diolefinas R-1001, el segundo ramal también se inyecta a control de flujo a la línea de salida del reactor R-1001 con la finalidad de mantener la relación $\text{H}_2\text{-HC}$ en las guardas de sílice R-1003 A/B, el tercer ramal se inyecta a control de flujo a la descarga de las guardas de sílice R-1003 C/D para mantener la relación $\text{H}_2\text{-HC}$ y mantener la temperatura de entrada al reactor de hidrodesulfuración R-1002, el cuarto ramal es una inyección normalmente sin flujo en la nafta de retorno del interenfriador del reactor de saturación de diolefinas. E-1101.

4.1.3. Sección de Fraccionamiento.

La función principal de esta sección es separar los hidrocarburos ligeros disueltos en la mezcla de naftas producto para producir nafta ligera como carga a Planta de Isomerización de pentanos-hexanos; así como la nafta pesada que será enviada como carga a la Planta Reformadora de Naftas (ver diagramas de flujo de proceso DFP-04 y DFP-05, figuras 4.4 y 4.5). Esta operación se lleva a cabo en dos torres separadoras: la torre desbutanizadora, T-1001 y la torre separadora de naftas, T-1002.

En esta sección se reciben dos corrientes líquidas que provienen de la Sección de Reacción; la primera es la corriente de nafta caliente efluente del tanque D-1002 y la segunda es la corriente líquida de nafta desulfurada procedente del tanque D-1011, ambas se unen para formar una nueva corriente alcanzando la mezcla una temperatura de 152 °C temperatura a la cual, la mezcla se envía previo precalentamiento hasta 160°C en el precalentador de naftas E-1010 hacia el primer separador de nafta a torre desbutanizadora D-1004 que opera a 160 °C y 10.2 kg/cm² man. A partir de este tanque se obtienen dos corrientes, la fase vapor se envía a enfriarse en el enfriador de gas Amargo E-1014 hasta una temperatura de 43 °C, posteriormente se recibe en el Segundo separador de nafta a torre desbutanizadora D-1005 que opera a una presión de 9.5kg/cm² man. y 43 °C, la finalidad de enfriar la corriente gaseosa del tanque D-1004, es para forzar a que los componentes pesados arrastrados por la fase gaseosa condensen y puedan ser recuperados para su procesamiento.

A partir del tanque D-1005 se obtienen dos corrientes, la gaseosa rica en incondensables así como en H₂ y H₂S se envía a integrarse a control de presión con los gases amargos que se obtienen como destilado vapor de la torre desbutanizadora T-1001. La corriente líquida se le eleva la presión hasta 15.6 kg/cm² man en la segunda bomba de carga a torre desbutanizadora P-1007/R para enviarse a control de flujo en cascada con el nivel del tanque D-1005 al plato 9 de la torre desbutanizadora T-1001, para su fraccionamiento.

La corriente líquida del tanque D-1004 se maneja mediante la primer bomba de carga a la torre desbutanizadora P-1002/R, la cual le eleva la presión hasta 15.6 kg/cm² man. para su envío a control de flujo en cascada con el nivel del tanque D-1004 como alimentación hacia el precalentador carga/fondos de torre desbutanizadora E-1011 A/B.

La mezcla se precalienta en el E-1011 A/B de 160 °C hasta 220 °C para posteriormente alimentarse al plato 14 de la torre desbutanizadora T-1001, el precalentamiento se logra aprovechando la energía de la corriente de fondos de la misma torre T-1001.

La torre desbutanizadora T-1001 tiene la finalidad de producir como producto de domos una corriente de destilado vapor constituido por incondensables amargos ricos en H₂ y H₂S, así como metano y etano. Por los fondos de la misma se obtiene una mezcla de naftas ligera-pesada totalmente desbutanizada.

La torre desbutanizadora opera a una presión de 12.5 kg/cm² man y una temperatura en el domo de 83 °C, la temperatura del acumulador de reflujo es de 43 °C, el fondo de la torre opera a 260 °C y una presión de 12.8 kg/cm² man. La temperatura de retorno del rehervidor de la torre desbutanizadora es

de 269 °C con una vaporización molar del 50%; esta torre cuenta con 30 platos y una relación de reflujo base molar de 7 para garantizar la separación.

La torre esta diseñada para que eventualmente cuando la carga contenga LPG lo separe y se pueda recuperar. Bajo esta consideración la producción máxima de LPG será de 183 BPD y las condiciones de operación de la columna en cuanto a presión se mantendrán en 12.5 kg/cm² man. y 71 °C en el domo de la torre y 41 °C y 12.15 kg/cm² man en el tanque acumulador de reflujo D-1006, la relación de reflujo se ajustara a 3.5 base molar y las condiciones térmicas del fondo se mantendrán como se explico anteriormente.

El gas amargo que se obtiene como producto de domos de la torre T-1001 se envía a control de presión a mezclar con el gas amargo procedente del segundo tanque separador de nafta D-1005, a la mezcla resultante se les incorpora el gas de purga de la sección de reacción y la mezcla resultante se enviará a endulzamiento hacia la Planta de Coquización Retardada a una presión de 6 kg/cm² man y una temperatura de 47 °C.

El líquido a partir del tanque D-1006 se divide a dos destinos, hacia el reflujo y hacia límite de batería.

El liquido del acumulador D-1006 se maneja mediante la bomba de reflujo de la torre desbutanizadora P-1003/R, la cual le eleva la presión hasta 19.5 kg/cm² man., la línea de salida de P-1003/R se divide en dos ramales uno de los cuales es enviado a control de flujo en cascada con el control de temperatura del plato 4 como reflujo al plato 1 de la torre desbutanizadora. El otro ramal es la línea de LPG que normalmente se encuentra sin flujo, en operación el LPG envía a control de nivel hacia la sección de endulzamiento de la Planta de Coquización Retardada a una presión de 18 kg/cm² man. y 42 °C.

Asimismo el agua amarga se acumulará y se drenará a partir de la pierna del tanque D-1006 para enviarse a control de nivel al tanque colector de aguas amargas D1017.

La corriente liquida producto de fondos de la torre desbutanizadora a 260 °C y 12.8kg/cm² man. se divide en dos corrientes, la primera se envía directamente a precalentar la carga a la misma torre T-1001 hacia el E-1011A/B de donde sale a 206 °C para enseguida enviarse a precalentar la mezcla de naftas al intercambiador E-1010 de donde la corriente sale a 198 °C para su envío a control de nivel de la torre T-1001 como alimentación al plato 14 de la torre separadora de naftas T-1002 a una temperatura de 179 °C.

La segunda corriente se maneja mediante la bomba del rehervidor de la torre desbutanizadora P-1006/R(T), la cual, le eleva la presión hasta 17.9 kg/cm² man. para su envío a control de flujo hacia el rehervidor de la torre desbutanizadora H-1002, de donde el efluente del mismo tiene 50 % de

vaporización molar y una temperatura de 269 °C para su retorno al fondo de la torre desbutanizadora T-1001 a una presión de 12.9 kg/cm² man.

La torre separadora de naftas T-1002 tiene la finalidad de fraccionar la mezcla de naftas, para obtener por los domos una corriente de nafta ligera constituida por una mezcla de pentanos-hexanos para su integración como carga a la planta de Isomerización de pentanos-hexanos, así como por los fondos una corriente de nafta pesada que se enviará como corriente de carga a la Planta Reformadora de Naftas.

La torre T-1002 opera a una presión de 1.8 kg/cm² man. y 100 °C en el domo y a 1.5 kg/cm² man. y 86 °C en el tanque acumulador de reflujo de la torre separadora de naftas D-1007, en los fondos la columna operará a una presión de 2.2 kg/cm² man y 182 °C, para garantizar la separación de naftas.

Los vapores efluentes del domo de la torre T-1002 se envían al Condensador de la torre separadora de naftas, EA-1003, donde se condensan totalmente y se introducen al acumulador de reflujo de la torre separadora de naftas, D-1007. La corriente líquida efluente de este acumulador entra a la bomba de reflujo de la torre separadora de naftas P-1004/R y eleva la presión hasta 8.7 kg/cm² la corriente de salida de la bomba se divide en dos corrientes, una se envía como reflujo a la torre T-1002 a control de flujo en cascada con el control de temperatura del plato 4 hacia el plato 1 de la torre.

La otra corriente líquida constituida por la mezcla de pentanos-hexanos producto se envía previo enfriamiento en el enfriador de nafta ligera producto E-1008 A/E a control de nivel de manera normal como carga hacia la Planta Isomerizadora de Pentanos-hexanos a 6.5 kg/cm² man. y 38 °C y de manera eventual directamente al pool de gasolinas a las mismas condiciones.

La presión de operación de la torre se mantiene a través del control de presión localizado en el acumulador D-1007, en caso de aumentar abrirá hacia desfogue y en caso de bajar se abrirá la válvula de by pass caliente para minimizar la condensación y represionar la torre hasta el nivel requerido.

Los fondos de la torre T-1002 se divide en tres corrientes, la primera se maneja mediante la bomba de nafta pesada producto P-1005/R, la cual, le eleva la presión a la corriente de nafta hasta 7.9 kg/cm² man. para su envío hacia el primer enfriador de nafta pesada producto EA-1006, de donde sale a 62°C para su envío a control de nivel de la torre T-1002 de manera normal hacia la Planta Reformadora de Naftas a 5.7 kg/cm² man. y 62 °C, de manera eventual hacia almacenamiento previo paso a través del segundo enfriador de nafta producto E-1007 A/C de donde sale a 38°C y 5.0 kg/cm² man.

La línea de nafta pesada de apagado se toma del fondo de la torre separadora de Naftas a través de la bomba de nafta pesada de apagado P-1026/R(T) y se

le aumenta la presión hasta 58 kg/cm^2 para posteriormente pasar por el enfriador de nafta pesada de apagado EA-1013 donde se enfría de 182 a $55 \text{ }^\circ\text{C}$ para ser enviada a la sección de reacción.

La tercera corriente se maneja mediante la bomba del rehervidor de la torre separadora de naftas P-1025/R (T), la cual, eleva la presión de la corriente hasta 7.2 kg/cm^2 man. para su envío a control de flujo hacia el rehervidor de la torre separadora de naftas H-1003, de donde el efluente del mismo sale con 50% de vaporización molar y una temperatura de $192 \text{ }^\circ\text{C}$ para su retorno al fondo de la torre separadora de naftas T-1002 a una presión de 2.15 kg/cm^2 man.

4.1.4. Sección de Regeneración de Amina

La sección de regeneración de amina (DFP-06, figura 4.6) tiene como función eliminar el ácido sulfhídrico contenido en la amina rica proveniente de la torre de lavado con amina T-1003.

Esta corriente llega al asentador de amina rica D-1022, que mantiene constante su presión en 0.7 kg/cm^2 man. por medio de un controlador de rango dividido, el cual abre la válvula de salida gas a desfogue ácido en caso de alta presión o abre la válvula de entrada de nitrógeno en caso de baja presión.

El asentador de amina rica está dividido por mamparas en tres secciones, en donde se separan los vapores con alto contenido de hidrocarburos ligeros y ácido sulfhídrico, enviándose a desfogue. Del segundo compartimiento se separan los hidrocarburos líquidos para enviarlos mediante bombeo a SLOP o a tanque de recuperados. Finalmente, la amina rica que se encuentra en el tercer compartimiento se envía mediante la bomba de amina rica P-1020/R hacia el intercambiador de amina pobre/rica E-1019 A/B, previa inyección de inhibidor de corrosión a la succión. En el intercambiador E-1019 A/B la amina se calienta con la corriente efluente de fondos de la torre regeneradora de amina T-1004, teniendo así las condiciones adecuadas para entrar en el plato número 3 de la columna antes mencionada como una mezcla líquido-vapor.

La torre T-1004 opera en el domo a 1.1 kg/cm^2 man y $119 \text{ }^\circ\text{C}$ y en el fondo a 1.3 kg/cm^2 man y $126 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cuando el líquido de alimentación a la columna entra en contacto con los vapores calientes generados en el rehervidor de la regeneradora de amina E-1020 A/B se propicia la separación del ácido sulfhídrico del líquido.

El calor suministrado en el rehervidor es proporcionado por vapor de baja presión de 3.5 kg/cm^2 man y $150 \text{ }^\circ\text{C}$, regresando el líquido y el vapor generado por líneas separadas al fondo de la torre. El condensado del vapor de

baja presión que se genera en el rehervidor llega al separador de condensado de baja presión, D-1023, de donde se envía al sistema de recolección de condensados.

Los gases del domo de la torre, previa inyección de inhibidor de corrosión, pasan al primer condensador de la torre regeneradora de aminas EA-1008 de donde sale a 55 °C para su envío al segundo condensador de la torre regeneradora de aminas E-1021 A/D condensándose parcialmente y llegando al acumulador de reflujo de la torre regeneradora de amina D-1024 para separar las fases. El gas ácido a partir del tanque D-1024 se envía a control de presión a L.B. a 0.7 kg/cm² man y 43 °C, mientras que el líquido regresa al domo de la torre mediante la bomba de reflujo de la torre regeneradora P-1019/R a control de flujo en cascada con el control de nivel del tanque D-1024.

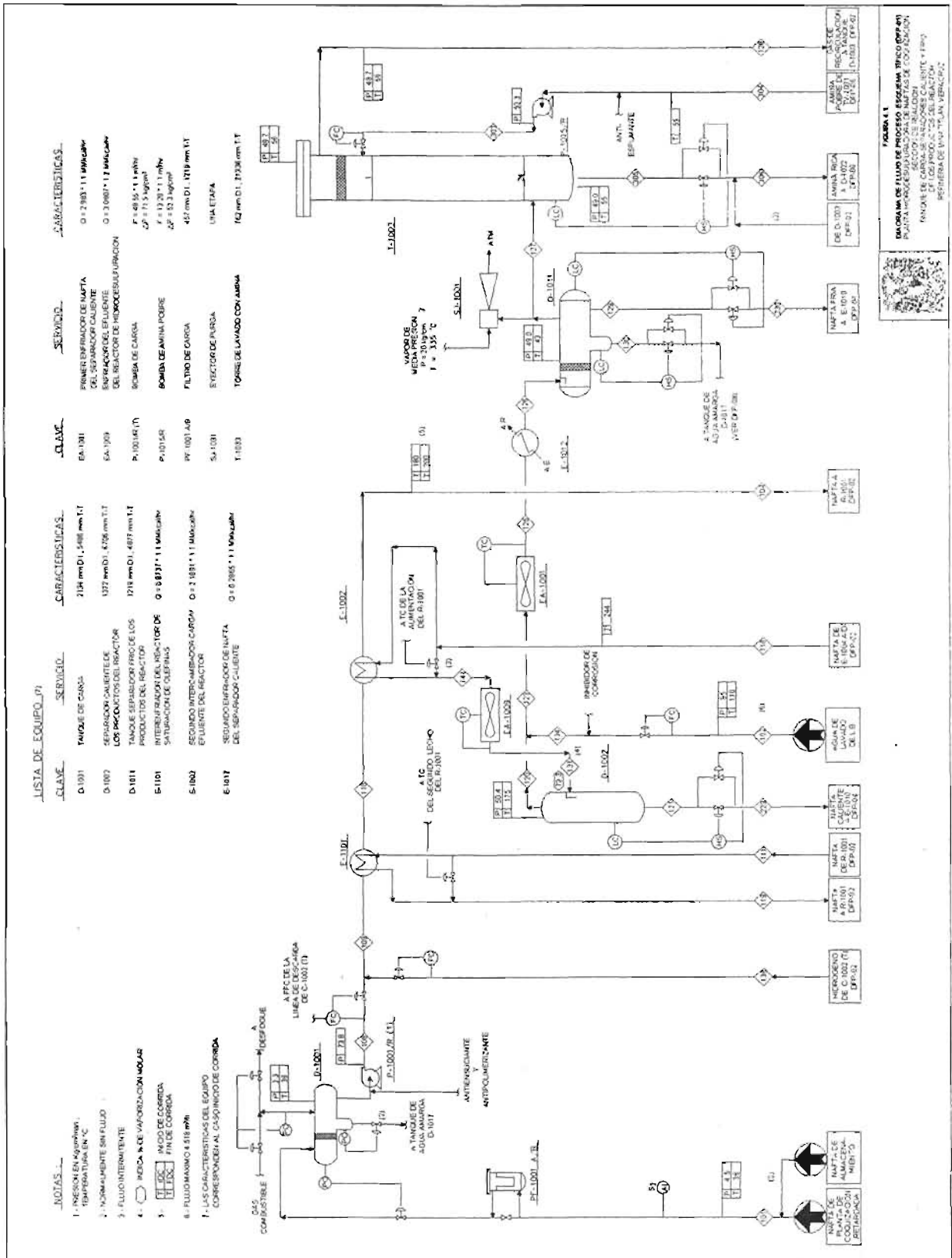
En caso de rechazo de gas ácido de planta de azufre o algún represionamiento en el acumulador de reflujo D-1024, se abrirá la línea de envío de gas ácido a desfogue ácido.

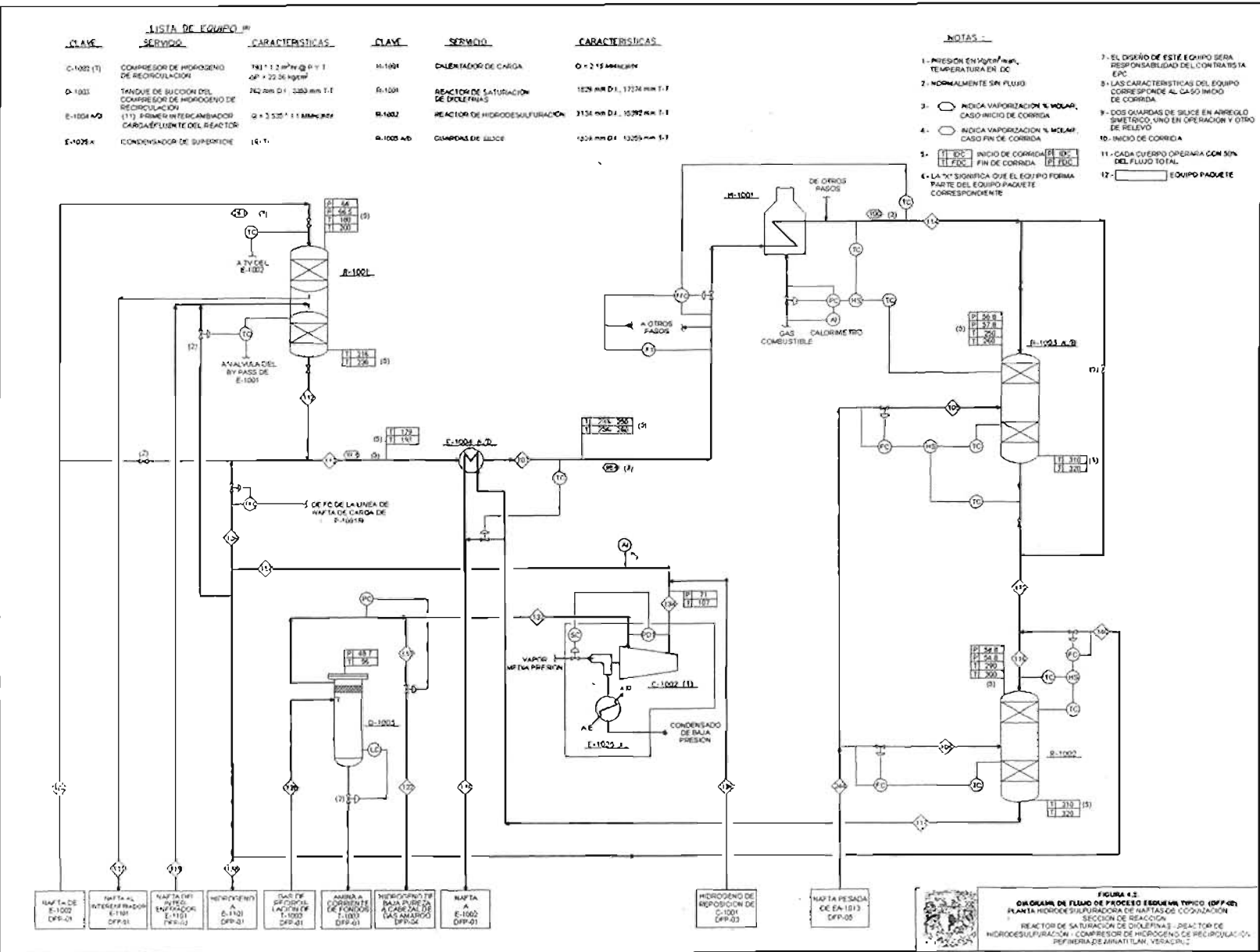
Este tanque al igual que el tanque asentador de amina rica D-1022 se diseñara con la inclusión de mamparas internas y malla separadora, de tal manera que los hidrocarburos se puedan manejar mediante bomba a Slop o tanque de recuperados. Esta bomba será actuada mediante un interruptor por alto nivel de arranque y paro por bajo nivel al igual para el tanque D-1022.

El producto de fondos de la torre T-1004 se enfría con la corriente de alimentación a la misma, en el intercambiador E-1019 y se le adiciona condensado de baja presión con la finalidad de reponer el agua perdida en el gas ácido y con ello mantener constante la concentración de la solución de dietanolamina al 20 % en peso. Posteriormente se le inyecta amina de reposición proveniente de la fosa de amina F-1001, la mezcla resultante se envía por medio de la bomba de amina regenerada P-1021/R al enfriador de amina pobre EA-1010 donde se enfría hasta 55 °C.

Una vez fría la amina pobre, aproximadamente el 20% en peso de la corriente total se pasa a través del tren de filtrado (Filtro de Cartucho de Amina Pobre PF-1002 A/B, del filtro de carbón de amina pobre PF-1003 y del post-filtro de cartucho de amina pobre PF-1004) con la finalidad de eliminar impurezas y productos de la degradación de la amina. Posteriormente esta corriente se une con la corriente principal y llega al tanque de amina pobre TV-1001, de donde se envía mediante la bomba P-1015/R a la torre de lavado con amina T-1003. El tanque cuenta con una recirculación (normalmente sin flujo) proveniente de la bomba P-1015/R, que tiene la finalidad de homogeneizar la solución de amina cuando se requiera.

CAPITULO 4. ASPECTOS CONSIDERADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE TUBERÍA DEL SRP DE LA PLANTA HDS DE NAFTA.





NOTAS:

- 1.- PRESIÓN EN kg/cm² man., TEMPERATURA EN °C
- 2.- LAS CARACTERÍSTICAS DE ESTE EQUIPO SERÁN DEFINIDAS POR EL CONTRATISTA Y EL PROVEEDOR DEL COMPRESOR DE HIDRÓGENO DE REPOSICIÓN.
- 3.- EL CONTROLADOR DE PRESIÓN DEBERÁ SER DE ACCIÓN INVERSA.
- 4.- LA "SI" SIGNIFICA QUE EL EQUIPO FORMA PARTE DEL EQUIPO PAQUETE CORRESPONDIENTE.
- 5.- LAS CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO CORRESPONDEN AL CASO TIPO DE CORRIENTE.

LISTA DE EQUIPO:

CLAVE	SERVICIO	CARACTERÍSTICAS
C-1001	COMPRESOR DE HIDRÓGENO DE REPOSICIÓN	F = 167 T/2 m ³ a 1.1 ΔP = 37.5 kg/cm ²
D-1001	TANQUE DE SUCCIÓN DEL COMPRESOR DE HIDRÓGENO DE REPOSICIÓN	610 mm Ø I., 3200 mm T. T
GA-1001X	ENFRACADOR DE RECIRCULACIÓN DE HIDRÓGENO DE REPOSICIÓN	(78°)

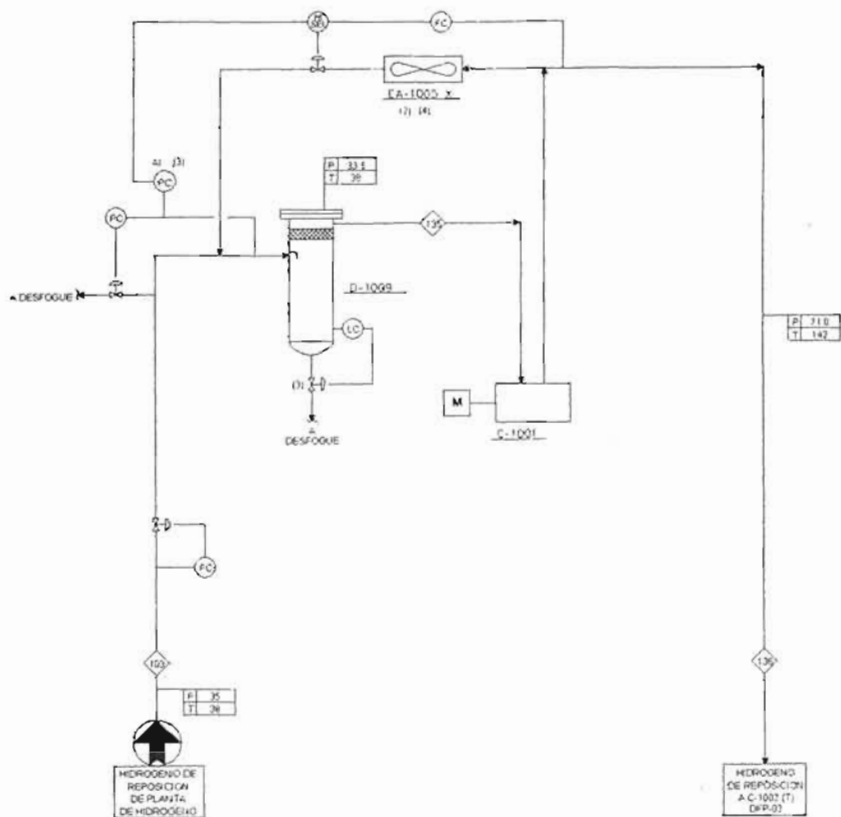
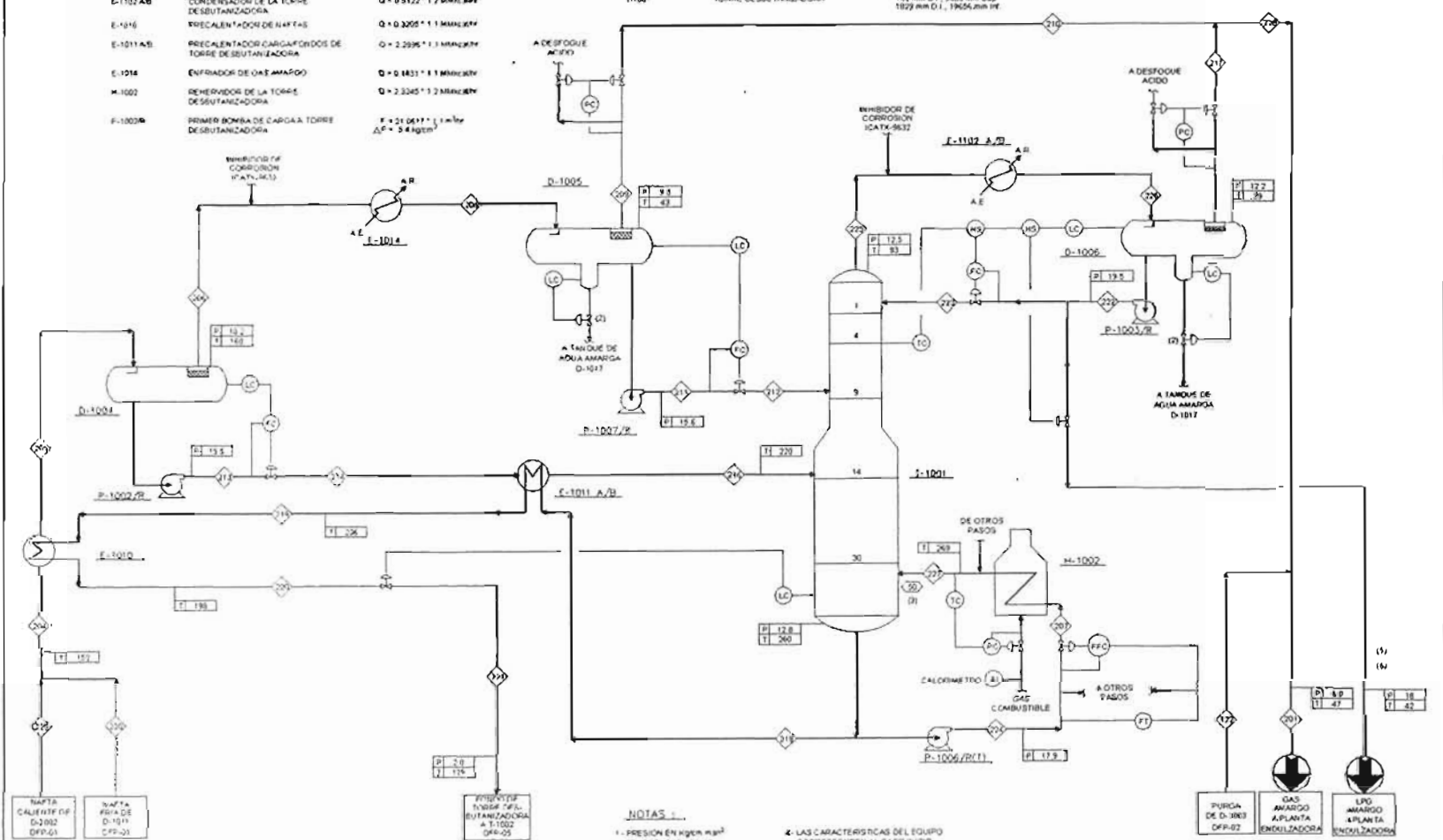


FIGURA 4.2
DIAGRAMA DE FLUJOS DE PROYECTO EQUERH (PROD) (SRP4)
PLANTA HIDROGENO - FUNDADORA DE NAFTAS DE COLOCACION
SECCION DE REACCION
COMPRESOR DE HIDROGENO DE REPOSICION
REF: N/A DE 04/11/14, VER: 01/2

LISTA DE EQUIPO (4)

CLAVE	SERVICIO	CARACTERÍSTICAS	CLAVE	SERVICIO	CARACTERÍSTICAS
D-1004	PRIMER SEPARADOR DE NAFTA A TORRE DESUTANIZADORA	2134 mm D.I., 6401 mm T.T.	F-1003/R	BOMBA DE REFLUJO DE LA TORRE DESUTANIZADORA	F = 9.741 * 1.2 m ³ /hr ΔP = 7.3 kg/cm ²
D-1005	SEGUNDO SEPARADOR DE NAFTA A TORRE DESUTANIZADORA	1719 mm D.I., 3530 mm T.T.	F-1006/R(1)	BOMBA DEL RESENVIOIR DE LA TORRE DESUTANIZADORA	F = 146.5 * 1.2 m ³ /hr ΔP = 5.1 kg/cm ²
D-1004	ACUMULADOR DE REFLUJO DE LA TORRE DESUTANIZADORA	1219 mm D.I., 2040 mm T.T.	F-1007/R	SEGUNDA BOMBA DE CARGA A TORRE DESUTANIZADORA	F = 1.226 * 1.1 m ³ /hr ΔP = 6.1 kg/cm ²
E-1102 AB	CONDENSADOR DE LA TORRE DESUTANIZADORA	Q = 0.5122 * 1.2 MMKG/HR	T-1001	TORRE DESUTANIZADORA	762 mm D.I., 9825 mm SUP 1822 mm D.I., 1965 mm HT
E-1016	PRECALENTADOR DE NAFTA	Q = 0.2205 * 1.1 MMKG/HR			
E-1011 AB	PRECALENTADOR CARGA FONDOS DE TORRE DESUTANIZADORA	Q = 2.2936 * 1.1 MMKG/HR			
E-1014	ENFRIADOR DE GAS AMARGO	Q = 0.1431 * 1.1 MMKG/HR			
M-1002	RESENVIOIR DE LA TORRE DESUTANIZADORA	Q = 2.2245 * 1.2 MMKG/HR			
F-1003/R	PRIMER BOMBA DE CARGA A TORRE DESUTANIZADORA	F = 51.0617 * 1.1 m ³ /hr ΔP = 3.4 kg/cm ²			



NOTAS:

- 1.- PRESION EN KG/CM² TEMPERATURA EN °C
- 2.- FLUJO INTERMITENTE
- 3.- INDICA % VAPORIZACION MOLAR
- 4.- LAS CARACTERISTICAS DEL EQUIPO CORRESPONDEN AL CASO TÍPICO DE CORRIJA
- 5.- NORMALMENTE SIN FLUJO
- 6.- PRODUCCION MAXIMA DE LPO 183 BPG




FIGURA 4.1.
DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO (E BODENA TÍPICO (DFF-44))
PLANTA NORDE SULFURADORA DE NAFTA DE CORDAZAROS
SECCION DE FRACCIONAMIENTO
TORRE DESUTANIZADORA
REFINERIA DE MINATITLAN, VERACRUZ

LISTA DE EQUIPO⁽¹⁾

C.A.M.	SERVICIO	CARACTERÍSTICAS
D-1007	ACUMULADORA DE REFLUJO DE LA TORRE SEPARADORA DE NAFTAS	1524 mm D.I., 26975 mm T.T
E4-1003	CONDENSADOR DE LA TORRE SEPARADORA DE NAFTAS	Ø = 2316 * 1.2 MM kcal/hv
E4-1004	PRIMER ENFRIDADOR DE NAFTA PESADA PRODUCTO	Ø = 2370 * 1.1 MM kcal/hv
E4-1013	ENFRIDADOR DE NAFTA PESADA DE APAGADO	Ø = 1530 * 1.2 MM kcal/hv
E-497 A/C	SEGUNDO ENFRIDADOR DE NAFTA PESADA PRODUCTO	Ø = 0.4120 * 1.1 MM kcal/hv
E-1009 A/E	ENFRIDADOR DE NAFTA LIGERA PRODUCTO	Ø = 0.0668 * 1.1 MM kcal/hv
M-1003	REHENVIDOR DE LA TORRE SEPARADORA DE NAFTAS	Ø = 16.200 * 1.2 MM kcal/hv
P-1004/R	BOMBA DE REFLUJO DE LA TORRE SEPARADORA DE NAFTAS	F = 42.7 * 1.2 m ³ /hr ΔP = 7.2 kg/cm ²
P-1005/R	BOMBA DE NAFTA PESADA PRODUCTO	F = 55.5 * 1.1 m ³ /hr ΔP = 5.7 kg/cm ²
P-1025/R (T)	BOMBA DEL REHENVIDOR DE LA TORRE SEPARADORA DE NAFTAS	F = 71.7 * 1.2 m ³ /hr ΔP = 5.0 kg/cm ²
P-1026/R (T)	BOMBA DE NAFTA PESADA DE APAGADO	F = 35.4 * 1.2 m ³ /hr ΔP = 5.5 kg/cm ²
T-1002	TORRE SEPARADORA DE NAFTAS	1524 mm D.I., 26975 mm T.T

NOTAS

- 1.- PRESIÓN EN Kg/cm² man., TEMPERATURA EN °C
- 2.-  INCIPENCIA VAPORIZACION NUCLEAR
- 3.- NORMA LÍNEA SIN FLUJO
- 4.- LAS CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO CORRESPONDEN AL C=80 #/H2O DE CORRIÓN

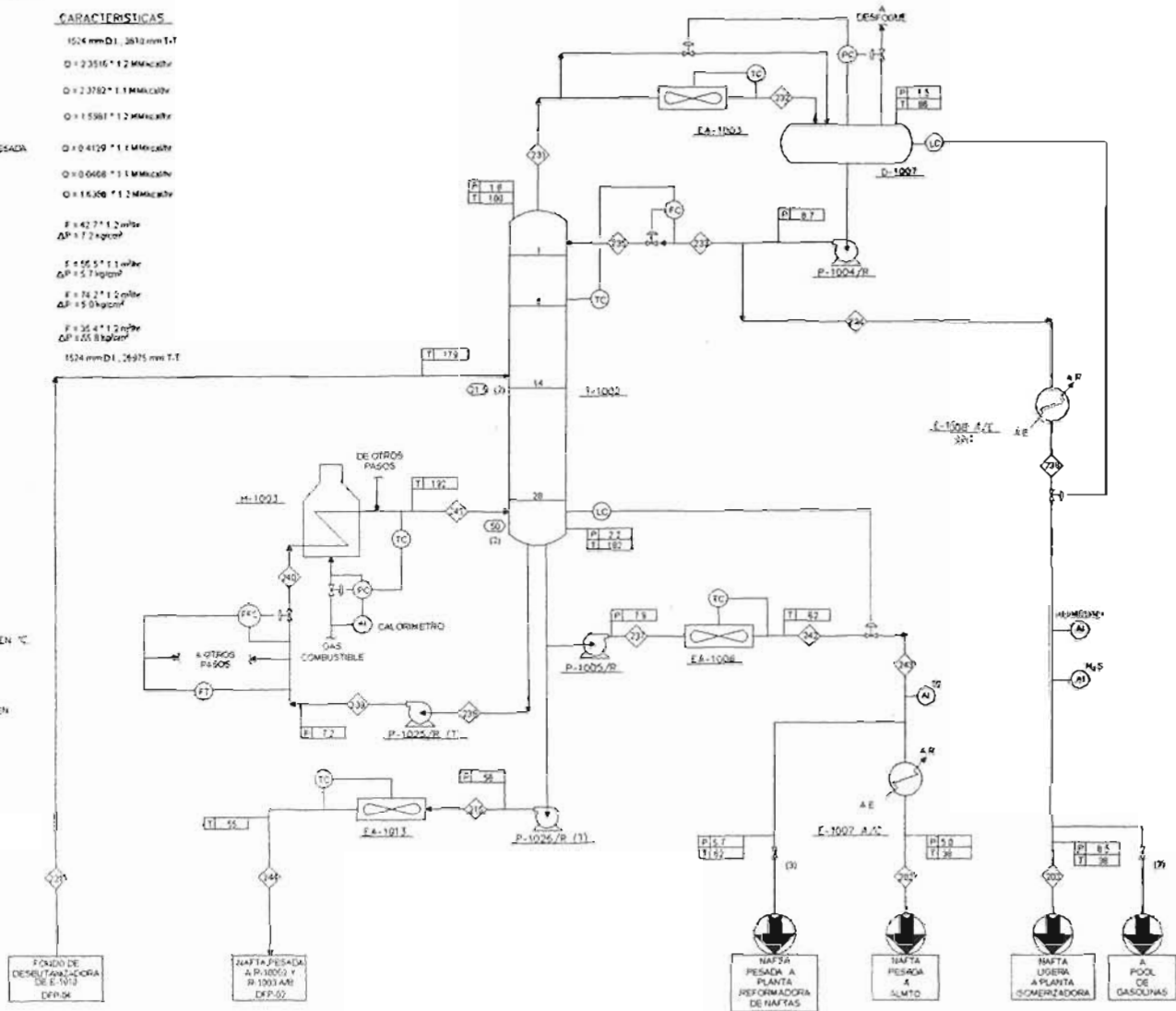
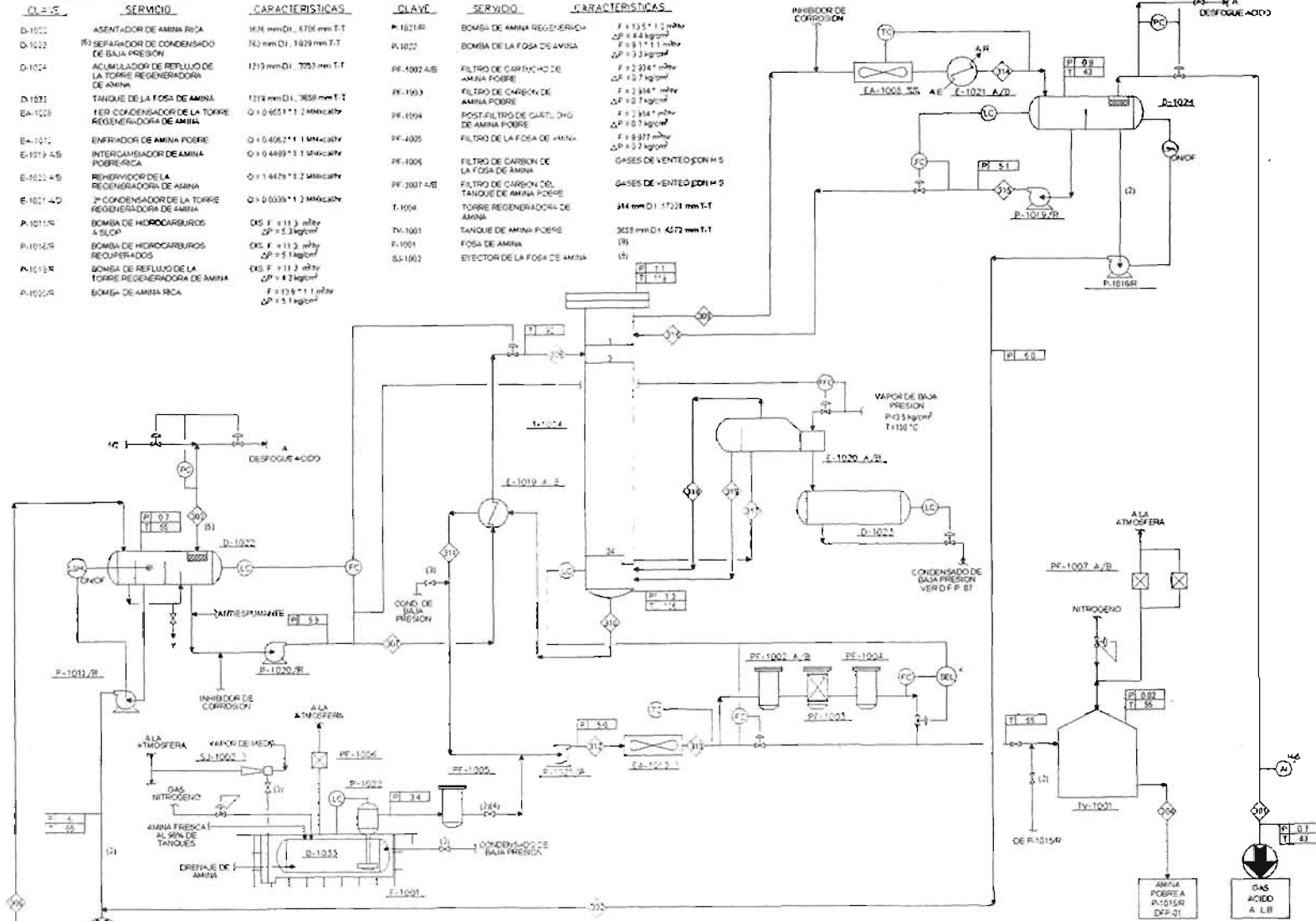


FIGURA 4.6.
DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO ESQUEMA TÍPICO (DFF-03)
PLANTA REFORMADORA DE NAFTAS DE COCAZACION
SECCION DE FRACCIONAMIENTO
TORRE SEPARADORA DE NAFTAS
REFINERIA DE MINATELAN, VERACRUZ

LISTA DE EQUIPO (1)

CLAS	SERVICIO	CARACTERISTICAS	CLAVE	SERVICIO	CARACTERISTICAS
D-1022	ASENTADOR DE AMINA RICA	1676 mm DI, 1705 mm T.T	P-1021R	BOMBA DE AMINA REGENERADA	F = 13.51 m ³ /hr ΔP = 8.4 kg/cm ²
D-1023	(R) SEPARADOR DE CONDENSADO DE BAJA PRESION	763 mm DI, 1929 mm T.T	P-1022	BOMBA DE LA FOSA DE AMINA	F = 9.11 m ³ /hr ΔP = 3.3 kg/cm ²
D-1024	ACUMULADOR DE REFLUJO DE LA TORRE REGENERADORA DE AMINA	1219 mm DI, 753 mm T.T	PF-1002 A/B	FILTRO DE CARBUÑO DE AMINA POBRE	F = 2.24 m ³ /hr ΔP = 0.7 kg/cm ²
D-1025	TANQUE DE LA FOSA DE AMINA	1219 mm DI, 3858 mm T.T	PF-1003	FILTRO DE CARBÓN DE AMINA POBRE	F = 2.24 m ³ /hr ΔP = 0.7 kg/cm ²
EA-1026	1ER CONDENSADOR DE LA TORRE REGENERADORA DE AMINA	Q = 0.9051 * 1.2 MINICAN	PF-1004	POST-FILTRO DE GARTLUNG DE AMINA POBRE	F = 2.24 m ³ /hr ΔP = 0.3 kg/cm ²
EA-1027	ENFRIADOR DE AMINA POBRE	Q = 0.4062 * 1.1 MINICAN	PF-1005	FILTRO DE LA FOSA DE AMINA	F = 9.92 m ³ /hr ΔP = 0.7 kg/cm ²
E-1028 A/B	INTERCAMBIADOR DE AMINA POBRE/RICA	Q = 0.4489 * 1.1 MINICAN	PF-1006	FILTRO DE CARBÓN DE LA FOSA DE AMINA	GASES DE VENTED DON H S
E-1029 A/B	REFRIERADOR DE LA REGENERADORA DE AMINA	Q = 1.4479 * 1.2 MINICAN	PF-1007 A/B	FILTRO DE CARBÓN DEL TANQUE DE AMINA POBRE	GASES DE VENTED DON H S
E-1021 A/D	2º CONDENSADOR DE LA TORRE REGENERADORA DE AMINA	Q = 0.0339 * 1.2 MINICAN	T-1004	TORRE REGENERADORA DE AMINA	314 mm DI, 1721 mm T.T
A-1011R	BOMBA DE HIDROCARBUROS A-SLOP	Q.S.F = 11.3 m ³ /hr ΔP = 4.3 kg/cm ²	TV-1001	TANQUE DE AMINA POBRE	3658 mm DI, 4272 mm T.T
P-1012R	BOMBA DE HIDROCARBUROS RECUPERADOS	Q.S.F = 11.3 m ³ /hr ΔP = 5.1 kg/cm ²	F-1001	FOSA DE AMINA	(R)
P-1013R	BOMBA DE REFLUJO DE LA TORRE REGENERADORA DE AMINA	Q.S.F = 11.3 m ³ /hr ΔP = 4.7 kg/cm ²	SS-1002	EYECTOR DE LA FOSA DE AMINA	(R)
P-1022R	BOMBA DE AMINA RICA	F = 13.9 * 1.1 m ³ /hr ΔP = 5.1 kg/cm ²			



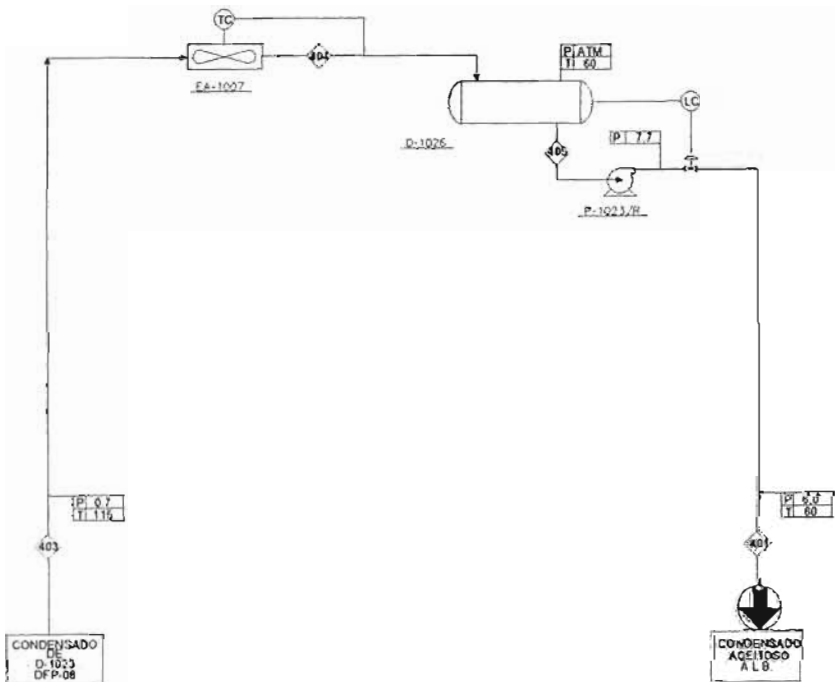
NOTAS:

1. PRESION EN kg/cm² max. TEMPERATURA EN °C
 2. NORMALMENTE SIN FLUJO
 3. FLUJO MAXIMO DE 14.7 t/h
 4. FLUJO MAXIMO DE 3880 t/h
 5. EL FLUJO DE ES HIDROCARBURO A DESFOQUE ACIDO
6. LAS DIMENSIONES DE ESTE EQ. PODRAN CAMBIAR DE LOS POR EL COSTO DEL EPC
7. LAS CARACTERISTICAS DEL EQ. P-1021R CORRESPONDEN AL CUALCUNO DE LOS SIGUIENTES:
8. EL QUELICO DE ESTE EQ. DEBE DETENERSE DURANTE LA TRAYECTORIA DEL FLUJO

FIGURA 4.6.
DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO ESQUEMA TIPO (DIPRO)
PLANTA HIDRODESULFURADORA DE NAFTAS DE COCAZACION
SECCION DE REGENERACION DE AMINA
TORRE REGENERADORA DE AMINA
REFRIERADOR DE MINUTILLAN, VERRICRUZ

LISTA DE EQUIPO (2)

CLAVE	SERVICIO	CARACTERÍSTICAS
D-1026	TANQUE DE CONDENSADO ACEITOSO	162 mm D.I., 1829 mm T-1
EA-1007	ENFRIADOR DE CONDENSADO ACEITOSO	$Q = 0.262 \cdot 1.2 \text{ MM kcal/h}$
P-1023/R	BOMBA DE CONDENSADO ACEITOSO	$F = 2.9 \cdot 1.1 \text{ m}^3/\text{h}$ $\Delta P = 7.7 \text{ kg/cm}^2$



NOTAS:

- 1.- PRESION EN Kg/cm^2 mm. TEMPERATURA EN $^{\circ}\text{C}$
- 2.- LAS CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO CORRESPONDEN AL CASO INICIO DE CORRIÓ.



FIGURA 4.2
DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO ESQUEMA TÍPICO (DFP-40)
PLANTA - PROCESO FUNDIDORA DE NAFTAS EG COCAZACION
SECCIÓN DE RECUPERACIÓN DE CONDENSADOS
REFINERÍA DE MEXICALTLAN, VERACRUZ

LISTA DE EQUIPO (4)

<u>CLAVE</u>	<u>SERVICIO</u>	<u>CARACTERISTICAS</u>
D-1017	TANQUE DE AGUAS AMARGAS	1217 mm D _J 3040 mm T-T
P-1010/R	BOMBA DE AGUAS AMARGAS	$F = 3.81 \times 1.1 \text{ m}^3/\text{h}$ $\Delta P = 5.40 \text{ kg/cm}^2$

NOTAS

- 1.- PRESION EN Kg/cm² man., TEMPERATURA EN °C
- 2.- NORMALMENTE SIN FLUJO
- 3.- FLUJO MÁXIMO 7.6 m³/h
- 4.- LAS CARACTERISTICAS DEL EQUIPO CORRESPONDEN AL CASO INICIO DE CORREDA

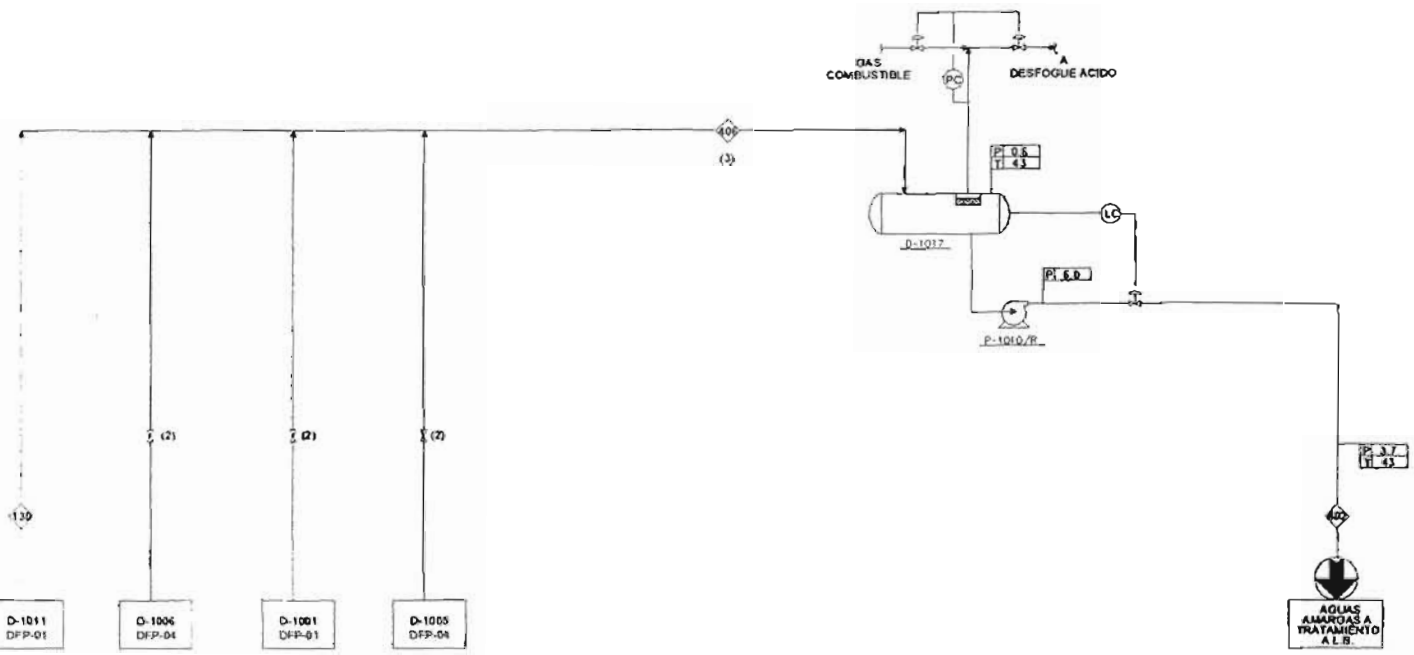


FIGURA 4.1.
DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO ESQUEMA TÍPICO (IDFP-09),
PLANTA HEDROELECTRIFICADORA DE NAFTAS DE COQUIZACIÓN
SECCIÓN DE RECUPERACIÓN DE AGUAS AMARGAS
REFINERÍA DE MINATITLÁN, VERACRUZ

4.2. Aspectos críticos del SRP en la Planta HDS de Naftas de Coquización.

Para tener un mejor panorama de la estructura del proceso, a continuación se presentan los diagramas de jerarquización del proceso de Hidrodesulfurización de Naftas de Coquización.

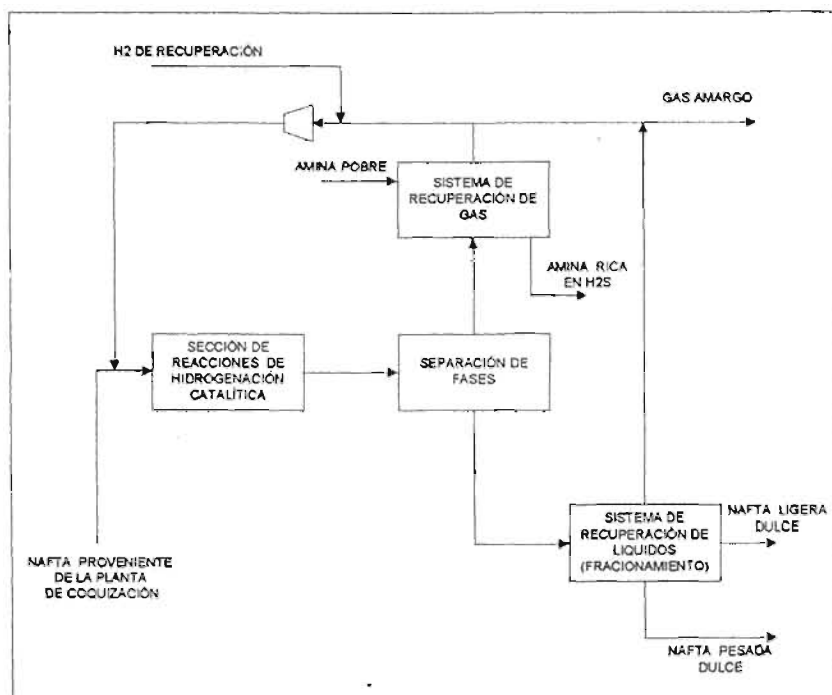


Figura 4.9. Diagrama del Sistema de Separación de la planta HDS de Naftas.

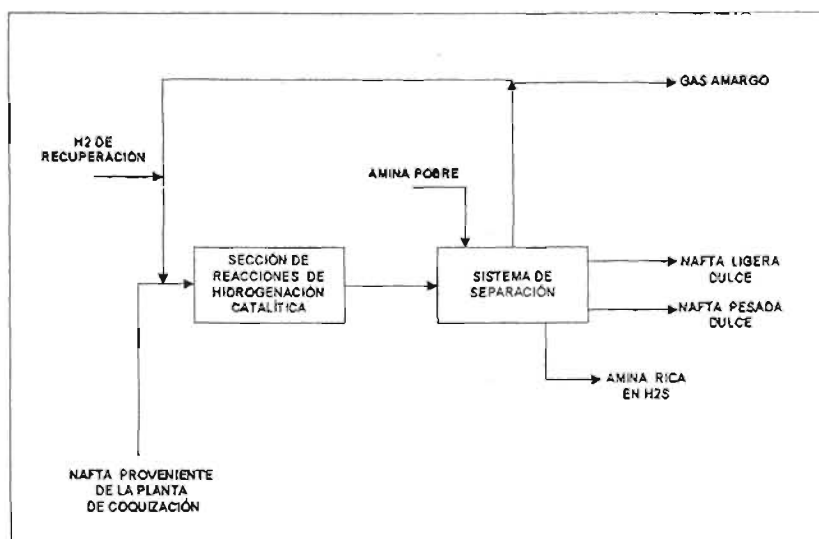


Figura 4.10. Diagrama del Sistema de Recirculación de la planta HDS de Naftas.

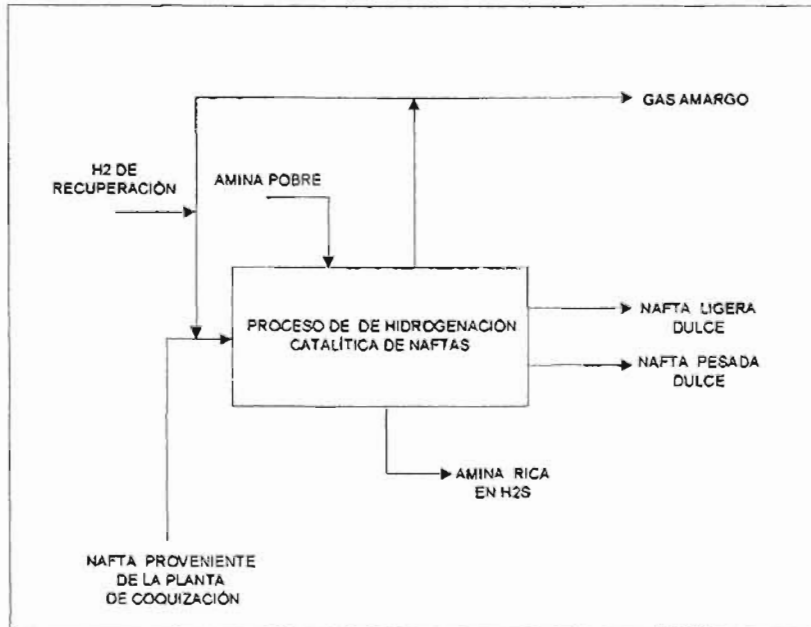


Figura 4.11. Diagrama del Sistema de Reacción de la planta HDS de Naftas.

Para implementar un sistema que proteja a los equipos y el personal que opera la planta, ante cualquier eventualidad que pueda ocasionar un accidente (explosión de un equipo, ruptura de una tubería, emisión a la atmósfera de fluidos tóxicos o inflamables, etc.) se hace un estudio de todas las posibles causas que pueden originar un aumento incontrolable en el volumen de los gases y que a su vez ocasionen una sobrepresión en equipos y tuberías; estas causas llamadas "de relevo" son mencionadas en el capítulo 1 entre las que se encuentran: falla de energía eléctrica, falla de agua de enfriamiento, fuego, descarga de fluido bloqueada por error humano, etc. Considerando lo anterior, se procede a realizar un análisis de riesgos del sistema en su conjunto, para ubicar los puntos débiles que requieren protección.

Como se menciona anteriormente la Unidad Hidrodesulfuradora de Naftas tiene el objetivo de eliminar componentes indeseables tales como: diolefinas, sílice, olefinas, azufre y nitrógeno mediante procesos de hidrogenación catalítica, separación y tratamiento; básicamente la planta se compone de tres secciones: sección de tratamiento, sección de Fraccionamiento y de Regeneración de amina.

El SRP de la Unidad Hidrodesulfuradoras básicamente está distribuido en tres secciones diferentes: alta presión, baja presión y ácido; dicha segregación obedece a la consideración de separar componentes de alta y baja presión de manera arbitraria y evitar con ello el encarecimiento del sistema; así mismo permite el no mezclar componentes corrosivos o erosivos tales como el ácido sulfhídrico o aminas en sistemas totalmente independientes.

El sistema de reacción se opera entre una temperatura de 180 a 200°C y una presión del orden de 64.0 a 66.5 kg/cm² m, por lo cual básicamente, los dispositivos de relevo de presión están interconectados al cabezal de desfogue de alta presión, debido a que el proceso es altamente exotérmico; se debe regular la temperatura en el reactor de hidrodesulfuración, para tal fin se emplean corrientes de apagado bien sea con hidrógeno o con nafta dulce del propio proceso a control cascada flujo-temperatura a cada lecho del reactor, dicha operación comunica a sistemas de alta con baja presión, por lo cual es indispensable contar con dispositivos de relevo de presión que permitan proteger los lados débiles del proceso a baja presión (figura 4.12).

El efluente ya hidrodesulfurado del reactor permite precalentar la carga al primer y segundo intercambiador carga - efluente, disminuyendo su temperatura hasta 219 °C y una presión de 51.2 Kg/cm² m; en esta etapa se separan los efluentes del reactor, primero en el separador caliente y posteriormente en el separador frío para su procesamiento en la sección de fraccionamiento una vez mezclados los efluentes del separador caliente y frío a una temperatura de 160 °C y 10.02 Kg/cm²m; la disminución de presión tan radical en el proceso se desarrolla en un conjunto de válvulas operadas a control de nivel, las cuales cuentan con relevos automáticos evitando con ello la operación manual; dichos sistemas cuentan con elementos redundantes de todo el lazo de control y con dispositivos de relevo de presión que protegen al sistema en caso de una contingencia de flujo inverso o falla de válvula de control, siendo éste uno de los puntos más críticos a proteger en la planta (figura 4.13 y 4.14).

La sección de amina de la planta tiene como función eliminar el ácido sulfhídrico contenido en la amina rica proveniente de la torre lavadora con amina; por lo cual en esencia sus efluentes en caso de una eventualidad o incidente en la planta son enviados al sistema de desfogue ácido.

El continuo contacto de sistemas de alta y baja presión en la planta; la existencia de sistemas de reacción, así como la alta exotermicidad del proceso, conjuntamente hacen que las capas de protección de la planta deban ser altamente eficientes e inclusive redundantes, tal que permitan con un alto grado de confiabilidad evitar eventos graves, que ocasionen pérdidas humanas o materiales.

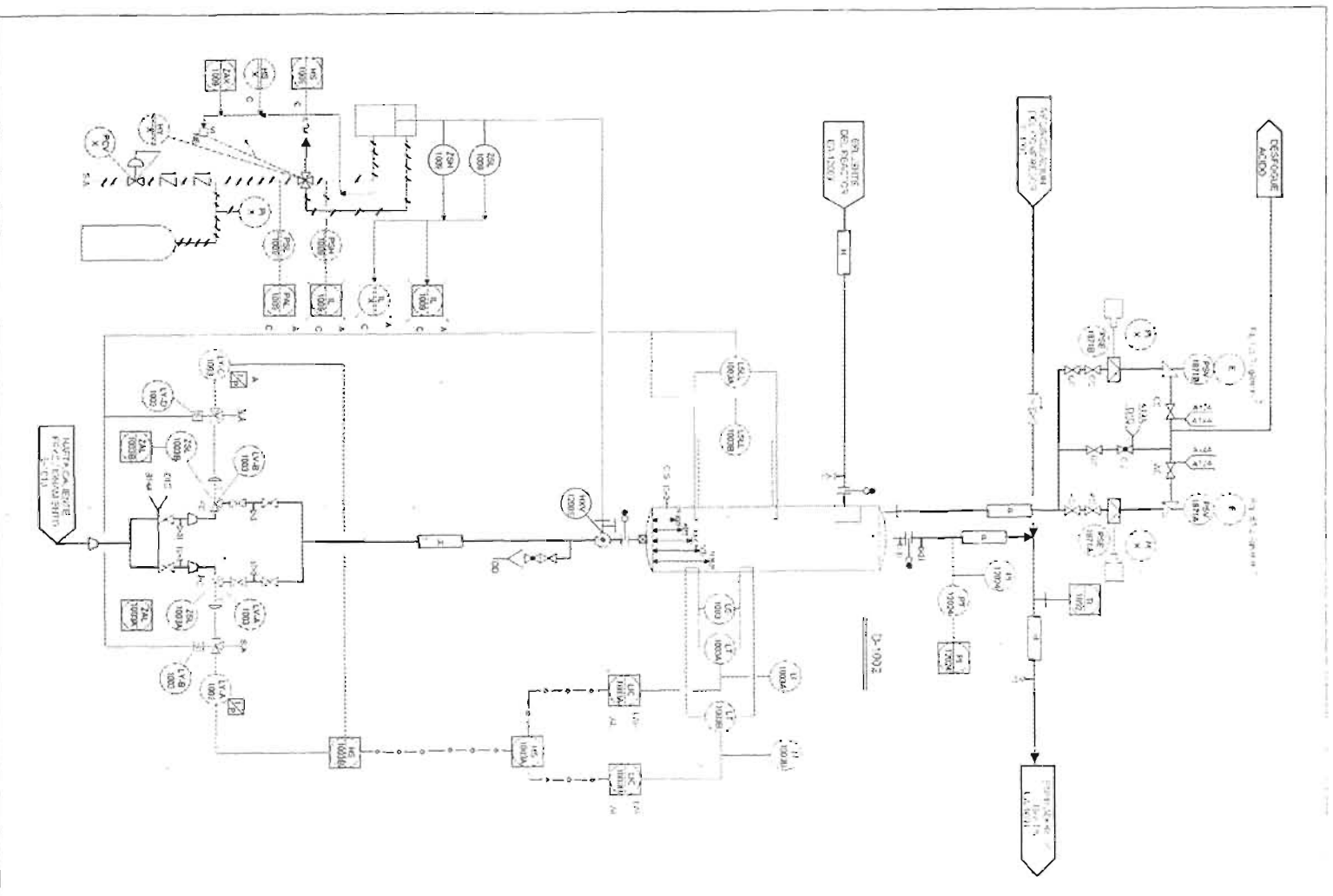


Figura 4.12. DRP de la sección de separación del proceso HDS de Naftas (separador caliente)

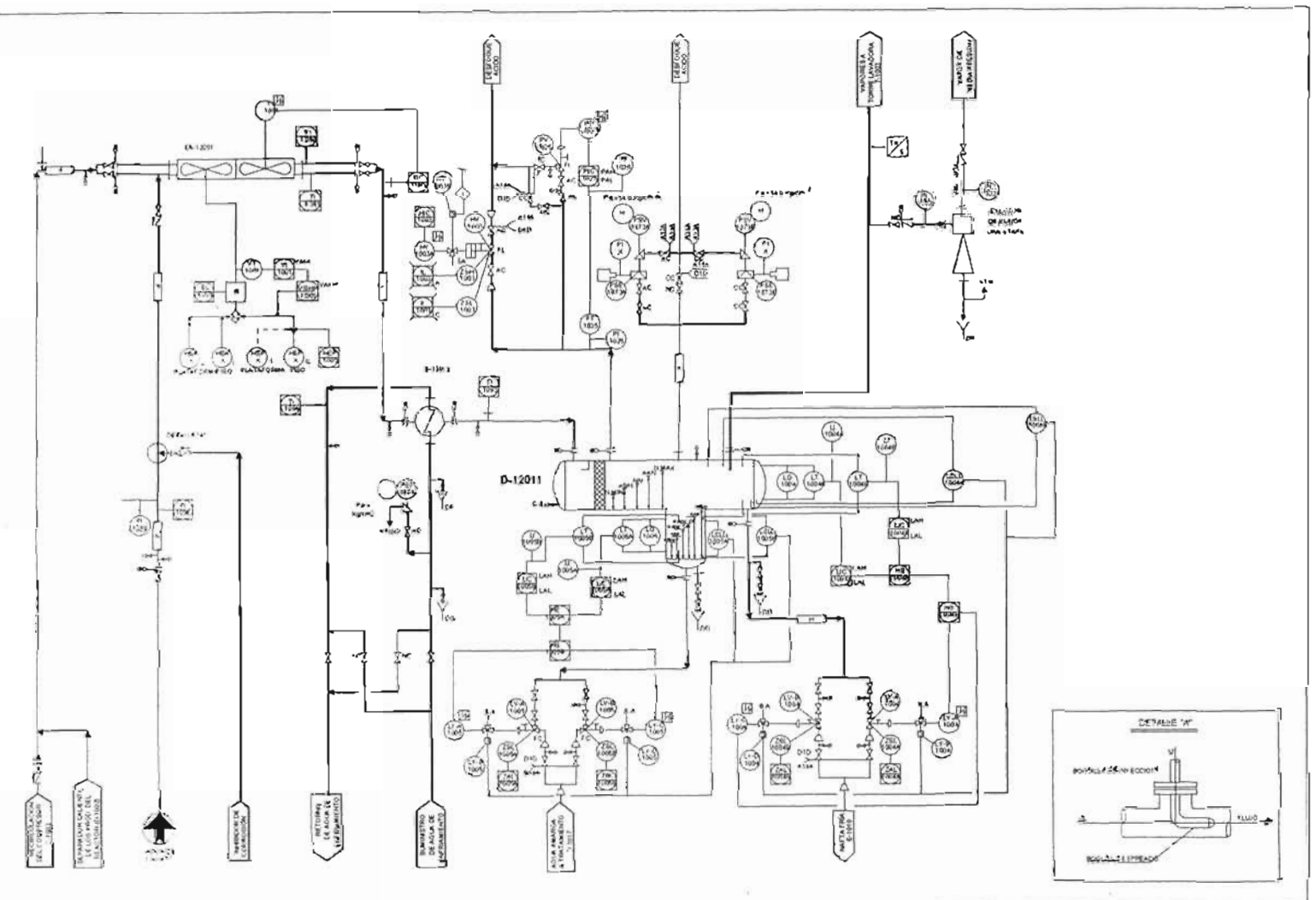


Figura 4.13. DRP de la sección de separación del proceso HDS de Naftas (separador frío)

4.3. Diagramas de desfogue del SRP de la planta HDS de Naftas.

El sistema de relevo de presión de la planta HDS de Naftas maneja tres cabezales para cumplir con la disposición de fluidos a relevar y están distribuidos dependiendo de las características de los mismos. Los cabezales que componen dicho sistema son: cabezal de baja presión (figura 4.9), cabezal de alta presión (figura 4.10), y cabezal de desfogue ácido (figura 4.11), los cuales nos muestran las válvulas que relevan a estos, así como los equipos a los que se protegen. Esta información es útil para poder determinar las trayectorias de la red, es decir la trayectoria que sigue el fluido relevado desde el equipo sobrepresionado hasta el tanque de desfogue correspondiente, por otra parte nos permite estimar las longitudes de los tramos de tuberías las cuales se obtienen ubicando los equipos protegidos, la trayectoria del cabezal y los tanques de desfogue dentro del Plano de Localización General.

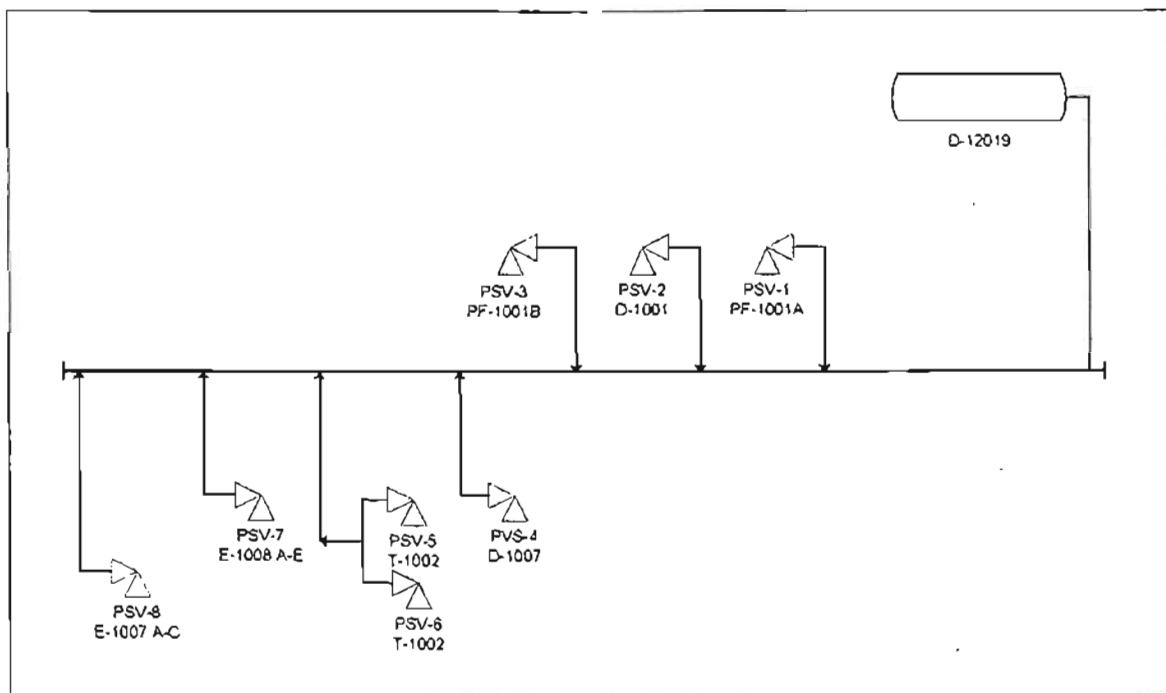


Figura 4.14. Red de tubería de baja presión del SRP de la planta HDS de Naftas.

CAPITULO 4. ASPECTOS CONSIDERADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE TUBERÍA DEL SRP DE LA PLANTA HDS DE NAFTAS.

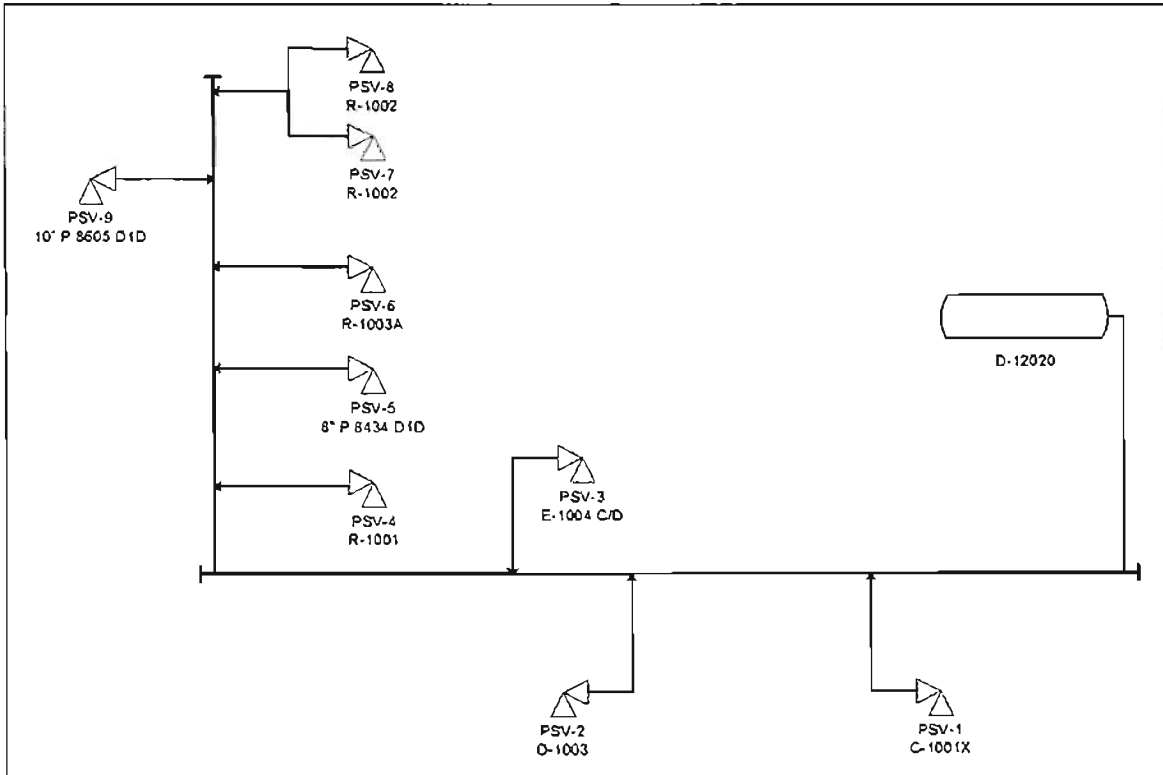


Figura 4.15. Red de tubería de alta presión del SRP de la planta HDS de Naftas.

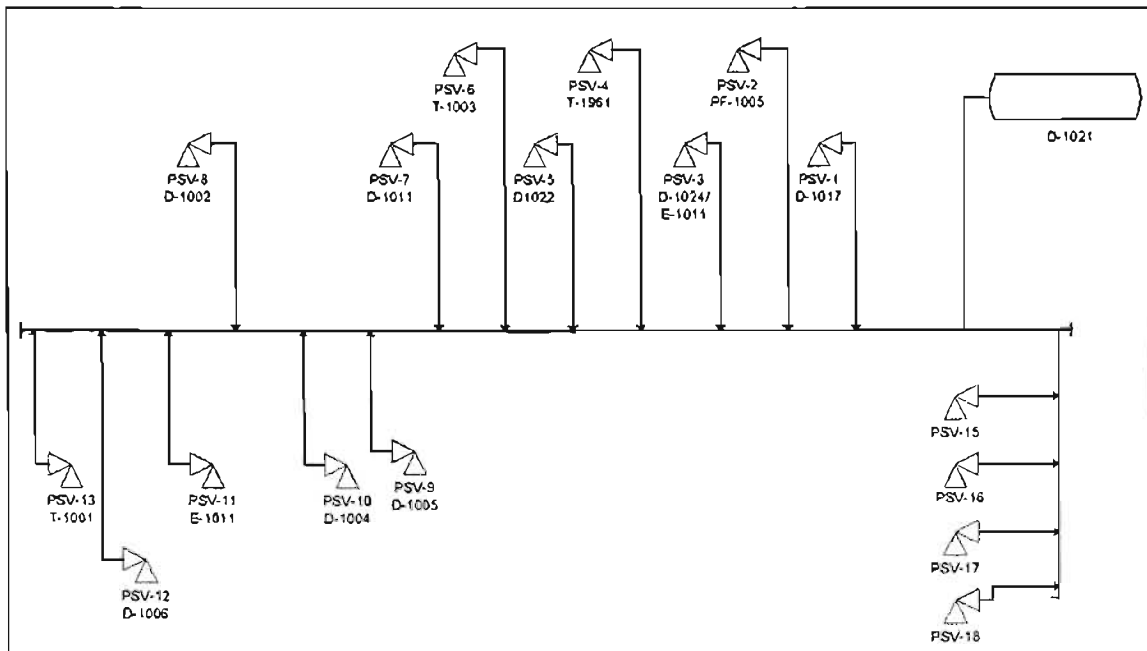


Figura 4.16. Red de tubería de desfogue ácido (parte1) del SRP de la planta HDS de Naftas.

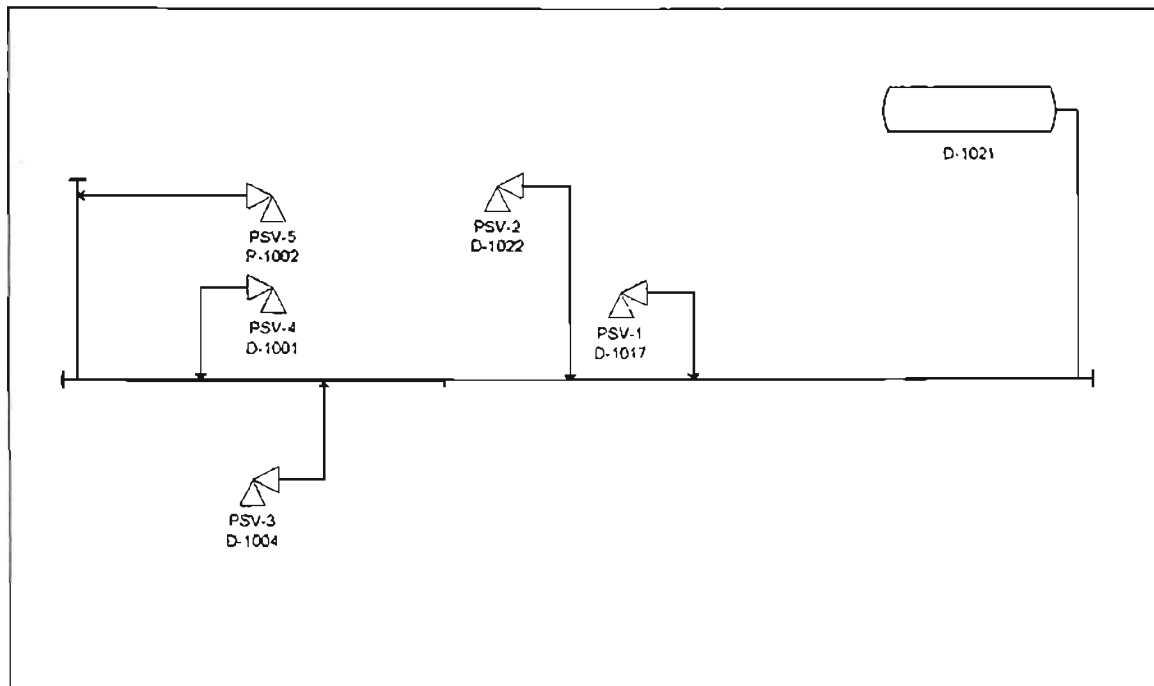


Figura 4.17. Red de tubería de desfogeo ácido (parte2) del SRP de la planta HDS de Naftas.

4.4. Obtención de datos de las válvulas de que componen el SRP de la planta HDS de Naftas.

Para la obtención de datos de las características de las válvulas, tales como, tipo de válvula, propiedades físicas de fluido que releva, así como las condiciones de relevo, que son necesarios en el cálculo de la red de tuberías, se hizo un análisis y simulación del sistema en HISYS con lo cuál se obtuvieron las hojas de datos de todas la válvulas que compones al SRP. Estas propiedades se muestran de la tabla 4.1 a la 4.5.

CAPITULO 4. ASPECTOS CONSIDERADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE TUBERÍA DEL SRP DE LA PLANTA HDS DE NAFTAS.

Tabla4.1. Datos de las válvulas que conforman el cabezal de baja presión de la planta HDS de Naftas.

PSV	PSV-1	PSV-2	PSV-3	PSV-4	PSV-5	PSV-6	PSV-7	PSV-8
Flujo a Relevar [=] lb/hr	2127.4	17306.1	2127.4	4761.9	7738.1	45776.3	4640.7	8754.5
Temp. De relevo [=] °F	426.200	426.200	426.200	226.400	395.600	395.600	314.600	460.400
Pres. de relevo [=] psig	111.866	111.866	111.866	58.515	65.399	62.583	206.522	154.892
Diám. del orificio salida de PSV [=] in	2.0079	2.9921	2.0079	2.9921	2.9921	5.9843	2.0079	2.9921
Máxim. Contrap. permisible [=] psig	33.5599	33.5599	33.5599	17.5544	19.6196	18.7748	61.9567	46.4675
K (Cp/Cv)	1.0720	1.0720	1.0720	1.0860	1.0570	1.0860	1.1410	1.0780
Joule Tompson	6.8071	4.1161	6.8071	1.0167	4.5682	4.9161	1.5221	4.2916
Z	0.8230	0.8230	0.8230	0.8820	0.8690	0.8740	0.7550	0.7920
PM	109.6	109.6	109.6	78.1	114.2	81.3	78.8	116.0
Tipo de válvula	B	B	B	B	B	B	B	B

Tabla4.2. Datos de las válvulas que conforman el cabezal de alta presión de la planta HDS de Naftas.

PSV	PSV-5	PSV-4	PSV-1	PSV-2	PSV-6A	PSV-6B	PSV-8	PSV-7	PSV-9	PSV-3
Pres. de relev. [=] in	1189.07	1189.07	1251.65	946.56	1118.66	1063.90	1049.82	1001.32	1063.90	1204.71
Máxim. Contrapresión permisible [=] psig	356.72	356.72	375.50	283.97	335.60	319.17	314.95	300.40	319.17	361.41
Temperatura de relevo [=] °F	501.80	501.80	293.00	343.40	798.80	798.80	746.60	746.60	798.80	536.00
Flujo a Relevar [=] lb/hr	3447.99	3447.99	1291.90	209.44	2583.79	88508.1	3073.21	117626	88508.1	6565.30
Diam. orific. salida de PSV [=] in	2.9921	2.9921	2.0079	2.0079	2.0079	5.9843	2.0079	5.9843	5.9843	2.9921
Tipo de válvula	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
K (Cp/Cv)	1.2210	1.2210	1.4150	1.3910	1.1350	1.1350	1.3030	1.1350	1.1350	0.1900
Z	1.0180	1.0180	1.0260	1.0170	0.9830	0.9830	1.0170	1.0040	0.9830	0.4820
PM	12.5200	12.5200	2.0300	3.5200	28.9600	28.9300	6.9000	28.0500	28.9300	17.7400

CAPITULO 4. ASPECTOS CONSIDERADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE TUBERÍA DEL SRP DE LA PLANTA HDS DE NAFTAS.

Tabla4.3. Datos de las válvulas que conforman el cabezal de desfogue ácido (parte 1) de la planta HDS de Naftas.

PSV	PSV-8	PSV-1	PSV-2	PSV-12	PSV-13	PSV-11	PSV-9
Presion de relevo [=] psig	946.5606	86.0510	110.1452	240.9427	234.6845	309.7835	206.5223
Máxima Contrapresión permisible [=] Pulg	283.9682	25.8153	33.0436	72.2828	70.4053	92.9350	61.9587
Temperatura de relevo [=] °F	480.2	278.6	303.8	131	512.6	471.2	320
Flujo a Relevar [=] lb/hr	3073.212	515.8764	1798.954	2843.934	10143.36	6560.89	7716.1
Diametro del orificio de salida de PSV [=] in	2.01	2.01	2.01	2.01	2.99	2.01	2.99
Tipo de valvula	B	B	B	B	B	B	B
K (Cp/Cv)	1.303	1.352	1.4	1.23	1.228	1.103	1.152
Z	1.017	0.979	0.98	0.855	0.775	0.808	0.958
PM	6.9	18.24	18.24	38.74	59.71	83.16	32.99

Tabla4.3. Datos de las válvulas que conforman el cabezal de desfogue ácido (parte 1) de la planta HDS de Naftas (continuación).

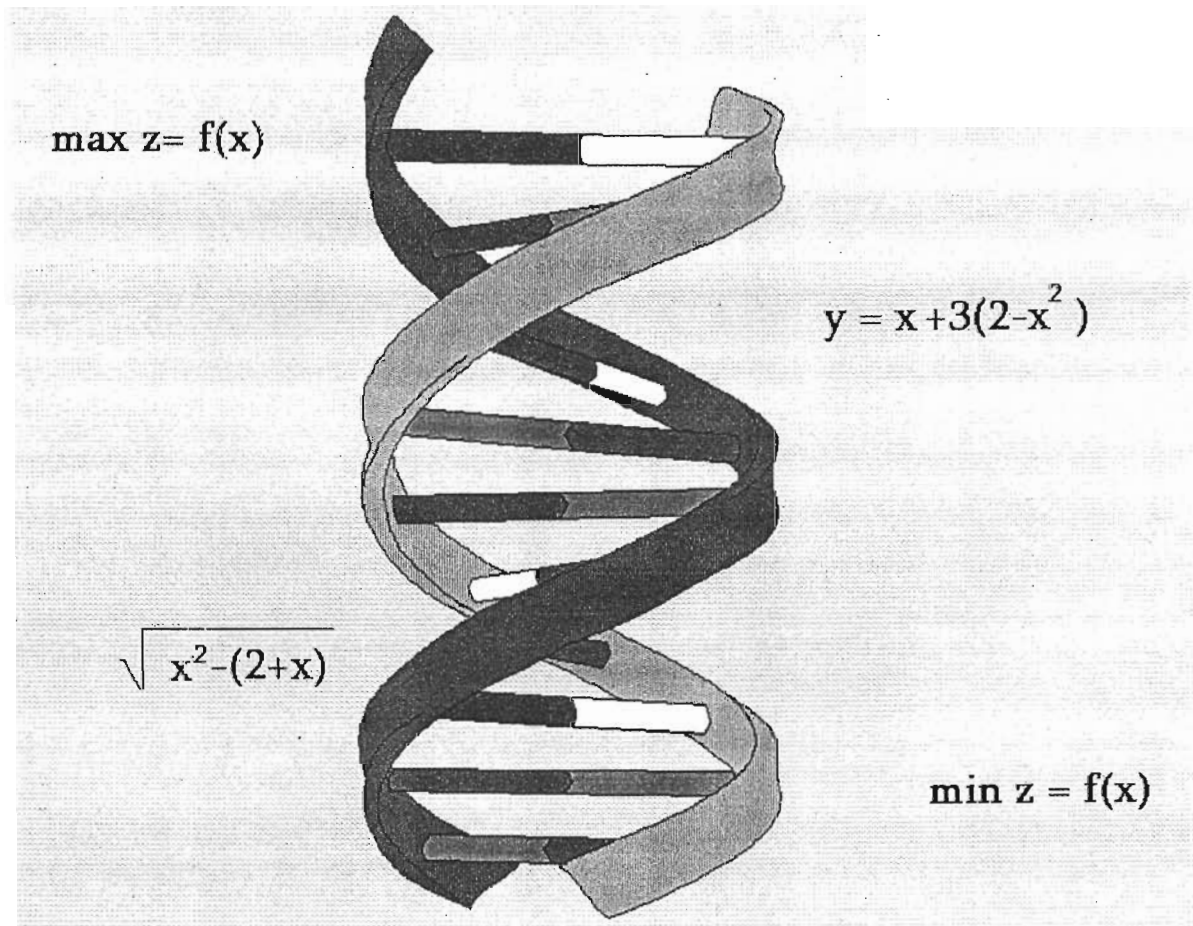
PSV	PSV-10	PSV-7	PSV-14 a 17	PSV-3	PSV-4	PSV-6	PSV-5
Presion de relevo [=] psig	223.7325	844.8640	108.4242	48.1885	46.9369	894.9300	46 4675
Máxima Contrapresión permisible [=] Pulg	67.1198	253.4592	32.5273	14.4566	14.0811	268.4790	13.9403
Temperatura de relevo [=] °F	392	530.6	327.2	233.6	282.2	410	221
Flujo a Relevar [=] lb/hr	11424.24	20202.95	2698.43	961.2056	4085.124	1267.645	1435.195
Diametro del orificio de salida de PSV [=] in	2.992126	2.992126	2.992126	2.007874	2.992126	2.007874	2.992126
Tipo de valvula	B	B	B	B	B	B	B
K (Cp/Cv)	1.091	1.3	1.4	1.337	1.344	1.463	1.336
Z	0.92	1.001	0.98	0.979	0.976	0.916	0.982
PM	57.88	8.72	18.24	31.46	19.97	20.96	28.18

Tabla4.4. Datos de las válvulas que conforman el cabezal de desfogue ácido (parte 2) de la planta HDS de Naftas.

PSV	PSV-2	PSV-4	PSV-5	PSV-3	PSV-1
Presion de relevo [=] psig	65.7116	125.1650	1032.612	219.0388	101.6966
Máxima Contrapresión permisible [=] psig	19.7135	37.5495	309.7835	65.7116	30.5090
Temperatura de relevo [=] °F	221.0000	426.2000	746.6000	392.0000	278.6000
Flujo a Relevar [=] lb/hr	10791.52	10862.06	10862.06	36816.82	10791.52
Diametro del orificio de salida de PSV [=] in	5.9843	5.9843	2.9921	5.9843	5.9843
Tipo de valvula	B	B	B	B	B
K (Cp/Cv)	1.3850	1.3800	1.3880	1.2270	1.3850
Z	1.0010	1.0030	1.0200	1.0020	1.0020
PM	3.4500	3.0000	3.0000	10.8700	3.4400

CAPITULO 5.

DISEÑO DE LA FUNCIÓN OBJETIVO Y ANALISIS DEL MODELO MATEMATICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SRP.



CAPÍTULO 5. DISEÑO DE LA FUNCIÓN OBJETIVO Y ANÁLISIS DEL MODELO MATEMÁTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE TUBERÍAS DEL SRP.

Para llevar a cabo la optimización de la red de tuberías del SRP es necesario el diseño de la función objetivo por lo que en el presente capítulo se realiza la formulación de la función objetivo además se plantea el modelo matemático para su solución, el cual consiste en la aplicación de un algoritmo genético.

5.1. Formulación del Problema.

El objetivo de la optimización es minimizar el capital de inversión de la red de tubería. La inversión es calculada mediante la suma de los costos de cada tramo de tubería de la red y el costo de cada tramo esta determinado por el producto de su longitud y el costo por unidad de longitud es evaluado por una función cuadrática de su diámetro, la cual se considera porque se ajusta mejor a los datos reales (figura 5.1). En una red con S tramos de tubería de diámetros d_k y longitud L_k la función objetivo se expresa como:

$$C(d_1, d_2, \dots, d_S) = \sum_{k=1}^S L_k (\alpha + \beta d_k + \gamma d_k^2) \quad (5.1)$$

donde α, β, γ , son los coeficiente de la ecuación de ajuste obtenidos de la gráfica que se muestra en la figura 5.1.

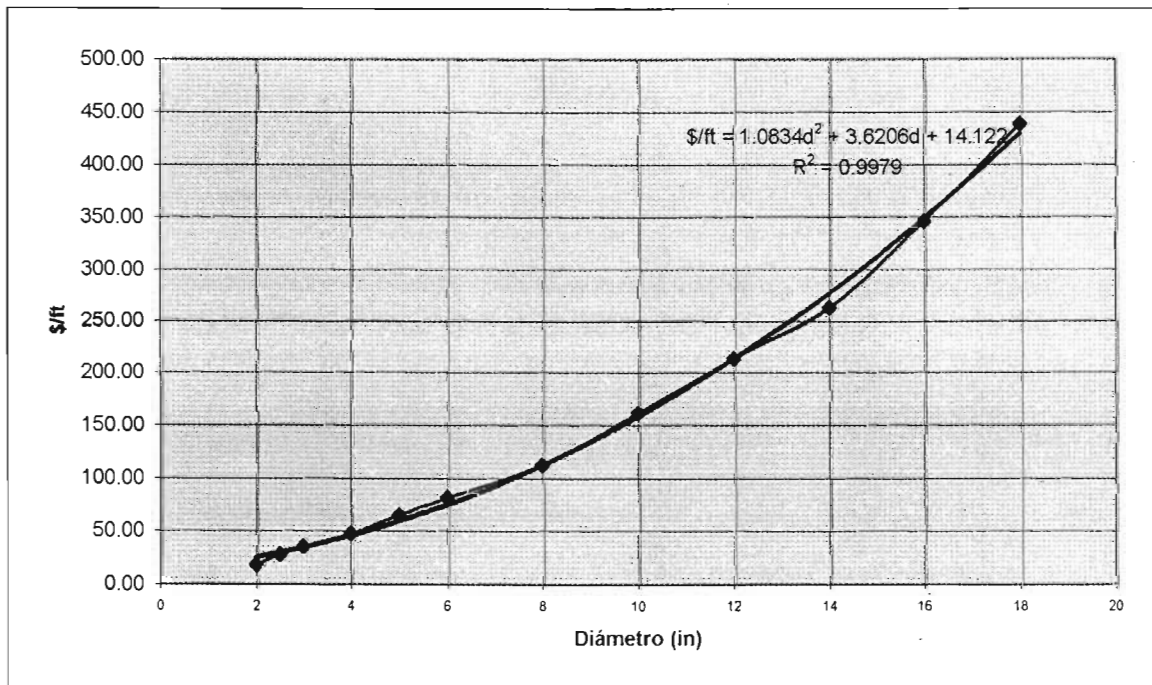


Figura 5.1. Costo por unidad de longitud vs diámetros.

Las restricciones del problema son los límites permisibles de caída de presión a lo largo de cada trayectoria válvula-quemador. En este caso la caída de presión en una tubería es modelada mediante la ecuación de Conison⁽¹⁵⁾.

$$P_1 = \sqrt{\left(\frac{fLV_2^2\rho_2}{2gcD}\right)(2P_2) + P_2^2}$$

en donde el factor de fricción f es calculado con la ecuación de Colebrook (ecuación 1.20).

Para fines de cálculo la ecuación de Conison es arreglada de la siguiente forma:

$$P_2^2 - P_1^2 = \frac{K_2 C_2}{d_2^5} \quad (5.2)$$

de donde

$$K = 1.2004 * 10^{-5} \frac{fLW^2T}{M} \quad (5.2.1)$$

$$C = \frac{P_2}{P_2 - P_{atm}} \quad (5.2.2)$$

- f = factor de fricción
- L = Longitud Total del tramo [ft]
- W = Flujo másico [lb/hr]
- T = Temperatura [°R]
- M = Peso molecular [lb/lbmol]
- P_1 = Presión de entrada a la tubería [lb/ft² man]
- P_2 = Presión de salida de la Tubería [lb/ft² man]
- P_{atm} = Presión Atmosférica [lb/ft²]

Usando la ecuación 5.2 para el cálculo de la caída de presión entre cada válvula t ($t = 1, \dots, N$) y el quemador queda de la siguiente forma

$$\sum_{k \in Q_t} (P_A^2 - P_B^2)_k = \sum_{k \in Q_t} \frac{K_k C_k}{d_k^2} \leq b_t \quad (5.3)$$

Donde Q_t es el conjunto de tramos en la trayectoria que conecta la válvula t con el quemador y b_t es el límite superior de la caída de presión para esta trayectoria.

La función objetivo (5.1) y las restricciones (5.3) ambas con una representación discreta de los diámetros, generan un problema de optimización de la forma

$$\text{Minimizar } C(d_1, d_2, \dots, d_s) = \sum_{k=1}^s L_k (\alpha + \beta d_k + \gamma d_k^2)$$

Sujeta a

$$\sum_{k \in Q_t} \frac{K_k C_k}{d_k^5} \leq b_t \text{ para } t = 1, \dots, N$$

$$d_k \in SD = [D_n | n = 1, \dots, ND] \text{ para } k = 1, \dots, S$$

Donde SD es el conjunto de ND diámetros comerciales D_n .

Esta formulación considera que todos los flujos de los tramos son previamente conocidos. Este problema puede ser resuelto usando algoritmos genéticos facilitando su solución debido a la robustez de su estructura. A continuación se presenta el método desarrollado para la solución del problema de optimización planteado anteriormente.

5.2. Planteamiento del método de optimización de la red de tuberías del SRP utilizando algoritmos genéticos.

En las siguientes subsecciones se describen las características particulares que componen al algoritmo de cálculo para la optimización de la red de tuberías del SRP cabe mencionar que el algoritmo se implementó en un programa de computadora, el cual está codificado en lenguaje Fortran 90, y contiene las siguientes partes constituyentes.

5.2.1. Datos de entrada utilizados por el método de optimización con Algoritmos Genéticos.

Primeramente se definen los parámetros utilizados por el algoritmo genético esto se realiza mediante la introducción de los datos en el archivo ga.inp, los cuales son:

- Tamaño de la población.
- Número de Parámetros o variables de decisión.
- Probabilidad de mutación.
- Número de generaciones.
- Probabilidad de cruzamiento.
- Utilización de elitismo (1 uso de elitismo, 0 no se usa elitismo).
- Tipo de cruzamiento (0 cruzamiento en un punto, 1 cruzamiento uniforme).

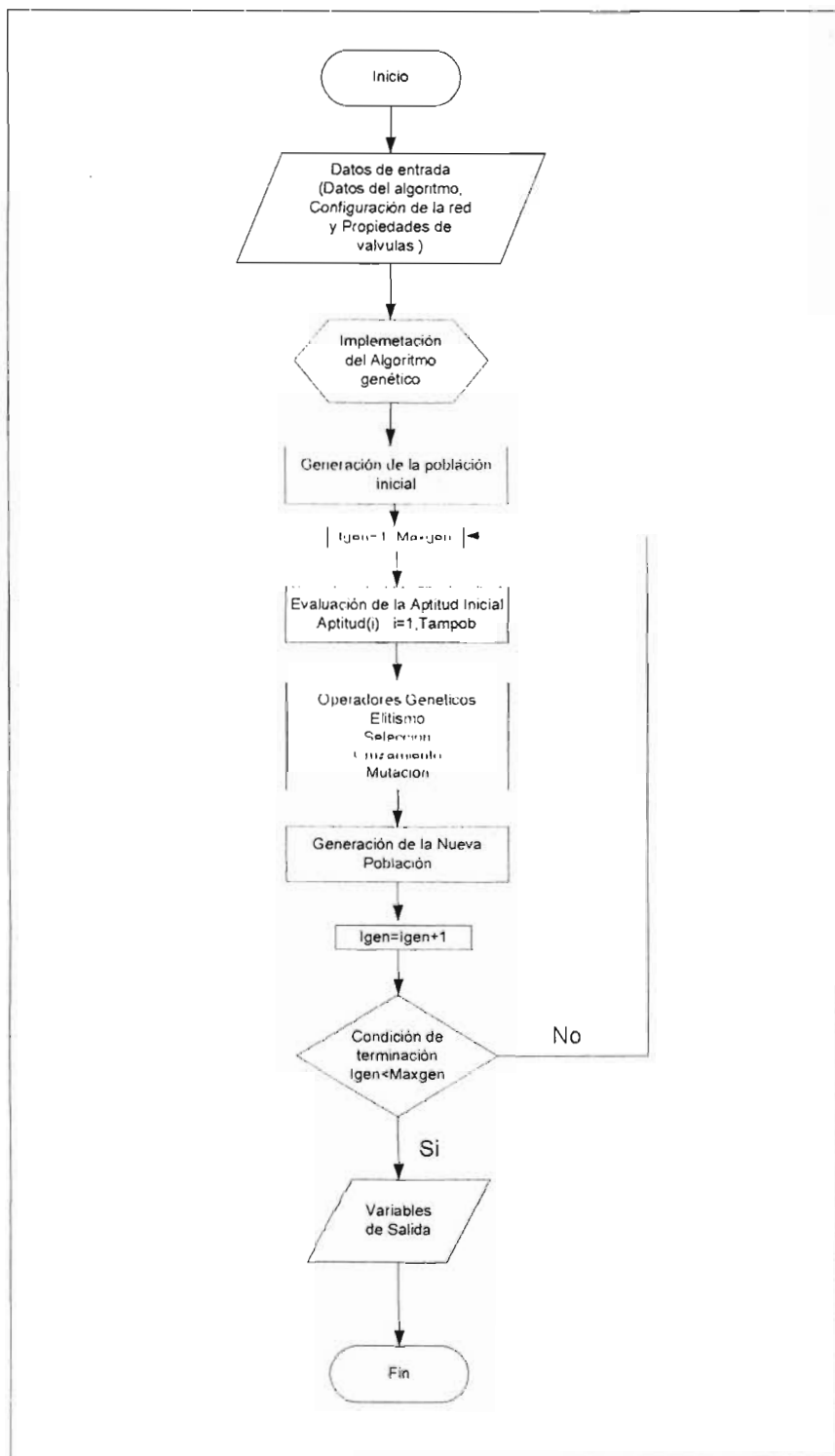


Figura 5.2. Método para la optimización de la red de tubería del SRP usando algoritmos genéticos.

Por otra parte es necesario introducir los datos de la configuración de la red que será calculada en el siguiente orden dentro de un archivo de texto:

- Numero de Tramos de la red
- Número de válvulas que componen la red
- Identificación de cada tramo
- Definir si el tramo esta unido a la Válvula (se codifica con 2) , si solo se trata de un tramo de tubería (se codifica como 1)
- Definir a que tramo de tubería descarga cada tramo de la red
- Secuencia de Cálculo de Propiedades
- Secuencia de Cálculo de Caídas de Presión

Finalmente los datos correspondientes a cada válvula que deben introducirse son:

- Gasto másico a relevar (lb/hr)
- Flujo molar (lbmol/hr)
- Peso molecular (lb/lbmol)
- Capacidad calorífica (BTu/lbmol^oR)
- Coeficiente adiabatico, K.
- Factor de compresibilidad, Z.
- Viscosidad (centipoise).
- Temperatura de Relevo (°F)
- Longitud (ft).
- Longitud equivalente de accesorios en cada tramo (L/D).
- Presión de relevo (psig)
- Máxima Contrapresión permisible (psig)
- Coeficiente Joule-Thomson (°R/psia)

Estos datos también se introducen en el archivo de texto que contiene la configuración, inmediatamente después; se deben introducir las propiedades, de cada tramo de tubería, en caso de que no se conozcan las propiedades de los tramos, debe colocarse en su posición el valor de 0. Es necesario introducir las propiedades de los tramos unidos a cada válvula. En cuanto a la temperatura y presión deben colocarse las condiciones de relevo de cada válvula.

5.2.2. Implementación del Algoritmo Genético.

5.2.2.1. Codificación.

En el desarrollo del algoritmo genético se utilizo codificación binaria para las variables de decisión (diámetros), cada alternativa de solución esta representada por una cadena binaria que después de ser decodificada se obtiene el diámetro de cada tramo de tubería, la ventaja de la representación binaria es la gran facilidad para ser transformada en entero o en real.

5.2.2.2. Generación de la población inicial.

La población se genera a partir de individuos (soluciones) creados aleatoriamente. Es decir se genera un número de soluciones igual al tamaño de población de forma aleatoria.

5.2.2.3. Evaluación de la aptitud.

La evaluación se realiza mediante la función de aptitud que permite evaluar que tan buena es una solución. La función de aptitud desarrollada dentro del algoritmo genético es similar a la utilizada por Costa et al.⁽¹⁸⁾, en donde la aptitud de una cadena (solución) incluye el costo de la red de tuberías y una medida de la violación de las restricciones de caída de presión:

$$F = \frac{1}{C(d_1, d_2, \dots, d_s) + r * \max \text{viol}} \quad (5.4)$$

donde C es el costo de la red (ecuación 5.1), r es el peso de la penalidad y donde maxviol corresponde al valor máximo de la violación de la restricción a través de la red de tuberías:

$$\max \text{viol} = \max_{\{t\}} \left[\sum_{k \in Q_t} \frac{K_k C_k}{d_k^{\bar{\alpha}}} - b_t \right] \quad (5.5)$$

es decir para obtener maxviol se calculan las violaciones que existen en cada trayectoria válvula- quemador sobre la presión disponible y se elige la mayor de ellas.

5.2.2.4. Operadores genéticos.

Dentro del algoritmo genético desarrollado se consideran los operadores: elitismo (la solución que presenta una mejor aptitud es pasada directamente a la nueva generación), selección (la selección se realiza mediante el mecanismo de torneos), cruzamiento (el tipo cruzamiento es uniforme) y mutación.

5.2.2.5. Generación de la nueva población.

Esta se obtiene después de utilizar los algoritmos genéticos en cada generación y posteriormente es utilizada como la población actual para dar origen a una nueva población formando así parte de un ciclo que esta determinado por la condición de terminación.

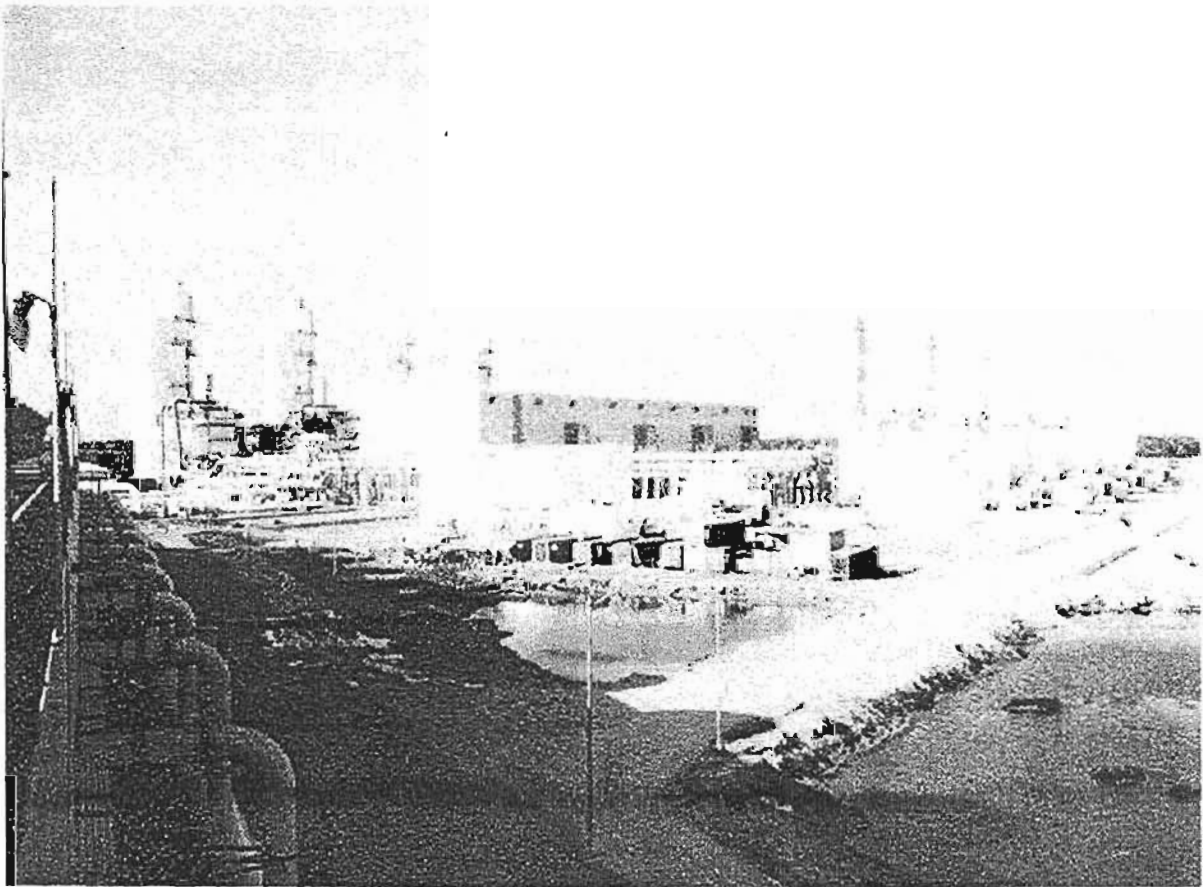
5.2.2.6. Condición de terminación.

Esta determinada por el número de generaciones que se definen, esto es, una vez que se ha realizado un número de ciclos de cálculo igual al número de generaciones se termina el uso del algoritmo genético.

5.2.2.7. Variables de salida.

Una vez terminado el uso del algoritmo genético se generan archivos de resultados que muestran las variables de salida donde se muestran los diámetros de cada tramo que minimizan el costo de la red de tuberías y que cumplen con las restricciones de caída de presión, además presenta las presiones de entrada de cada tramo así como la caída de presión disponible y la caída de presión del sistema, incluyendo el costo total de la red de tuberías (archivo Resultados.txt) además se genera un reporte de comportamiento del algoritmo a través de cada generación (archivo ga.out), así como un resumen que muestra los parámetros (diámetros) de la mejor solución que se logra en cada generación (archivo Resumen.txt).

CAPITULO 6. ANALISIS DE RESULTADOS.



CAPITULO 6. ANALISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se muestran y analizan los resultados obtenidos a partir del cálculo de los diámetros de las redes de tuberías que minimizan su costo aplicando el planteamiento que utiliza el algoritmo genético presentado en el capítulo anterior, además se realiza una comparación de los resultados obtenidos a partir del algoritmo genético con resultados obtenidos mediante un programa para el diseño de cabezales de relevo de presión que no considera la optimización de las redes, el cuál fue realizado y es utilizado en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).

6.1. Definición del problema.

El problema que se plantea en esta parte es la reducción del costo de la red total de tuberías del SRP de la planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización que forma parte de la Refinería "Lázaro Cárdenas" de Minatitlán Veracruz. Como se menciona en el capítulo 4, el SRP de esta planta está dividido en tres cabezales, debido a que se manejan fluidos con características diferentes que impiden el uso de un solo cabezal de relevo de presión los cuales son: Cabezal de alta presión, Cabezal de baja presión y Cabezal de desfogue ácido, este último se divide en dos secciones, como se muestra en las figuras 4.17 y 4.18. Para efectos prácticos solo se llevó a cabo la evaluación del costo de la red de tuberías que constituyen al cabezal de baja presión, y la segunda parte de red de tuberías que constituyen al desfogue ácido debido a que para estas dos redes se cuenta con información necesaria para poder llevar a cabo la optimización, no así para otras secciones del SRP. Cabe mencionar que el procedimiento que se desarrolla es similar para realizar la optimización de los demás cabezales. A continuación se muestra el desarrollo de la optimización utilizando el Algoritmo Genético.

6.2. Análisis de fallas.

En esta parte se analiza la causa de falla por la cual una o varias válvulas abren para realizar la acción de protección del equipo o línea a la cual están unidas, esto es importante ya que con esta información se procede a realizar el cálculo de la red.

En el caso de fallas por fuego, se puede considerar que el área en la cual se le confina se encuentra en $2,500 \text{ ft}^2$ ⁽²⁵⁾. Por consiguiente observando la distribución física de las válvulas de relevo en la planta, se determinaron dos zonas o áreas de fuego para el cabezal de relevo de baja presión, y en la tabla 6.1 se muestran las válvulas que contiene cada área.

Para realizar el análisis de fallas para el caso de estudio presentado, se obtuvo de las hojas de datos de cada válvula el tipo de falla para el cual fueron

diseñadas y se analizan en una tabla para determinar cual será el procedimiento de cálculo. A continuación se presentan el análisis de fallas de las válvulas que forman parte de las redes de tuberías del cabezal de baja presión y de la segunda sección del cabezal de desfogue ácido, correspondientes a las figuras 6.1 y 6.2.

Tabla 6.1. Análisis de Fallas para el Cabezal de Baja Presión.

PSV	Presión de relevo (psig)	Máxima Contrapresión Permisible (psig)	ΔP disponible (psi)	Falla
PSV-1	111.87	33.56	28.56	Fuego Area I
PSV-2	111.87	33.56	28.56	Fuego Area I
PSV-3	111.87	33.56	28.56	Fuego Area I
PSV-4	58.51	17.55	12.55	Fuego Area II
PSV-5	65.40	19.62	15.62	Fuego Area II
PSV-6	62.58	18.77	13.77	Fuego Area II
PSV-7	206.52	61.96	56.96	Fuego Area II
PSV-8	155.84	46.45	41.45	Reflujo

Tabla 6.2. Análisis de Fallas para el Cabezal de desfogue Ácido.

PSV	Presión de relevo (psig)	Máxima Contrapresión Permisible (psig)	ΔP disponible (psi)	Falla
PSV-1	101.7	30.51	25.51	Flujo Inverso
PSV-2	65.7	19.71	14.71	Flujo Inverso
PSV-3	219.0	65.71	60.71	Flujo inverso
PSV-4	125.2	37.55	32.55	Flujo Inverso
PSV-5	1032.6	309.8	304.8	Flujo Inverso

De este análisis tenemos que para la red de tubería de baja presión, las válvulas PSV-1, PSV-2 y PSV-3 tienen falla común y por tanto abren de forma simultánea, con lo que respecta a las válvulas PSV-4, PSV-5, PSV-6 y PSV-7 también tiene causa de falla común y abren de forma simultánea, cabe mencionar que no necesariamente estas válvulas abren al mismo tiempo que las válvulas que se encuentren dentro de Área de fuego I por lo que se tratan por separado. En la falla de la válvula PSV-8 se tiene que considerar como otro caso ya que es una falla independiente. Para el caso de la red de tuberías del desfogue ácido, se observa que todas las válvulas que la conforman, tienen causas de relevo independientes, y por tanto se deben tratar por separado cada una de ellas.

Una vez realizado el análisis de fallas se procedió a calcular los diámetros de las secciones de tubería de la red involucrados en cada falla, es decir, para la

red de baja presión, se realizaron tres cálculos debido a que presenta tres fallas, dos de tipo común, y una independiente, mientras que en la red de desfogue ácido se realizaron cinco ya que todas las fallas presentes son independientes. Una vez realizado este cálculo se tomó en cuenta que para determinar los diámetros de la red de tuberías final, es decir, contemplar todas las fallas, se consideró que los diámetros de las secciones de tubería que son comunes en cada falla están determinados por el diámetro mayor entre los obtenidos en cada caso, esto para asegurar que se cumplan los requerimientos de diseño.

En la figura 6.1 se muestra la configuración de la red de tuberías de baja presión utilizada para llevar a cabo la optimización del costo total de la misma. En esta figura se muestra la distribución de las válvulas en la red así como la identificación de cada tramo que la compone.

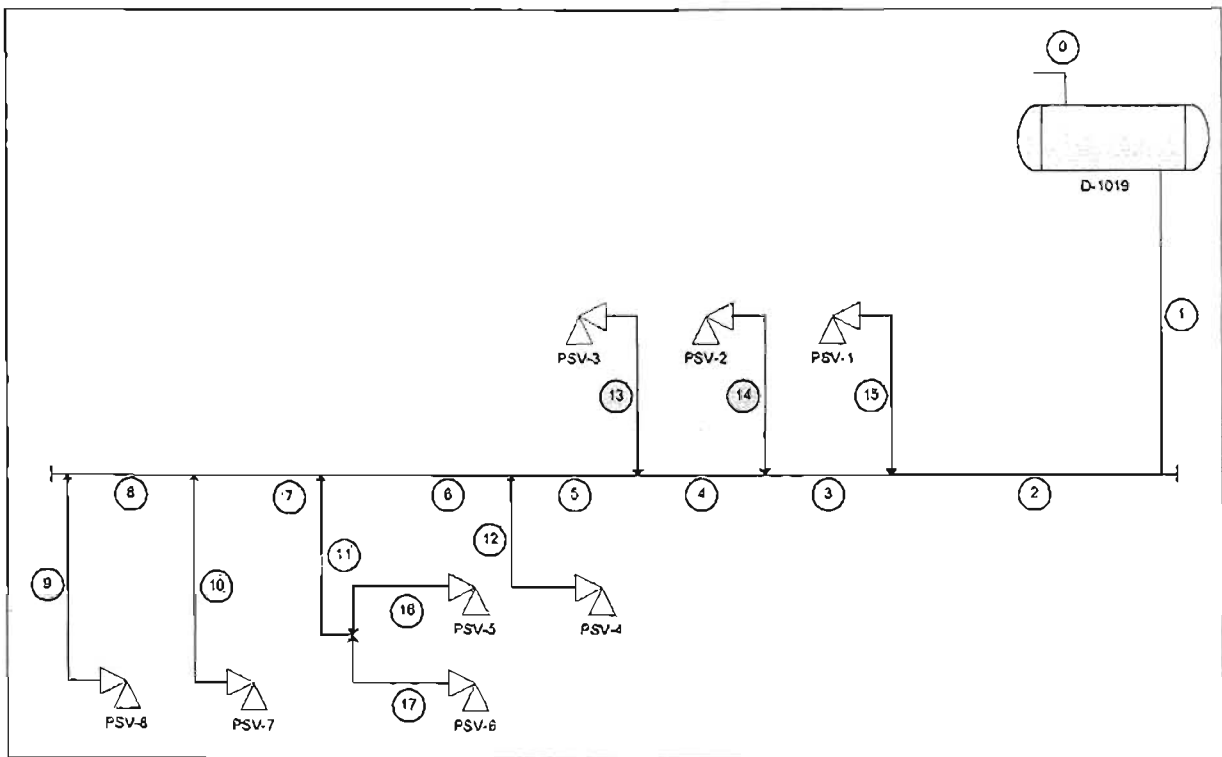


Figura 6.1. Esquema de la configuración de la red de tuberías del cabezal de baja presión de la planta HDS de Naftas.

La configuración correspondiente a la red de tuberías de desfogue ácido utilizada en la optimización se muestra en la figura 6.2, en donde se observa también la identificación que se asignó a cada tramo.

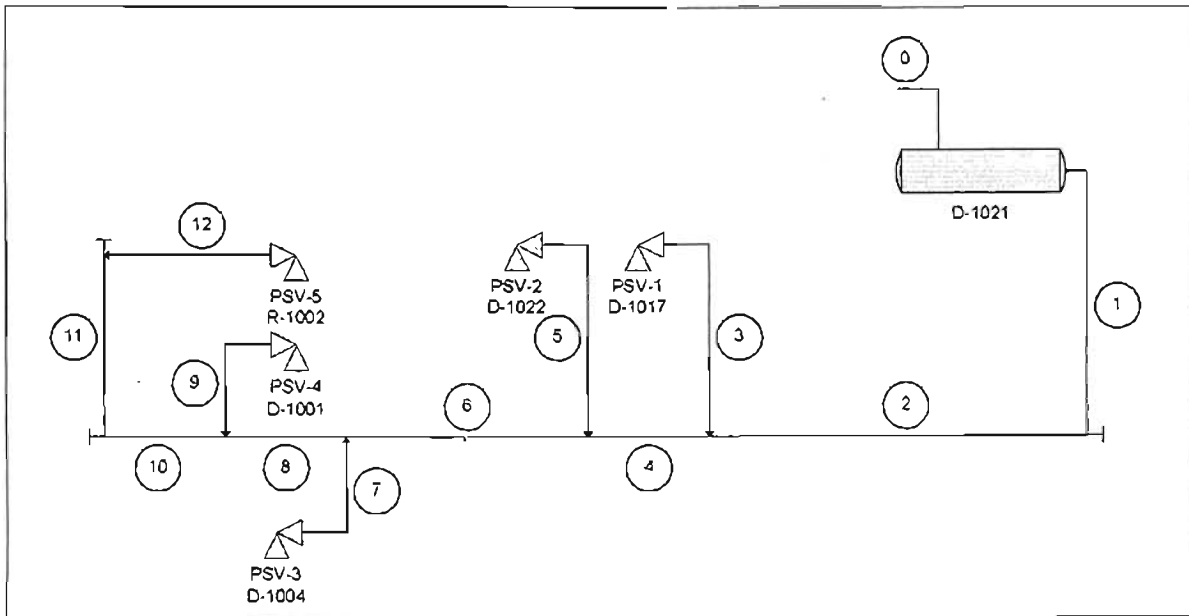


Figura 6.2. Esquema de la configuración de la red de tuberías del cabezal de desfogue ácido (parte 2) de la planta HDS de Naftas.

6.3. Datos utilizados en la optimización.

En esta sección se presentan los datos que se usaron para llevar a cabo la optimización de las redes de tubería antes mencionadas.

Los datos utilizados por el Algoritmo Genético para llevar a cabo la optimización se muestran en la tabla 6.3, cabe mencionar que estos valores pueden ser modificados para observar el comportamiento del AG.

Tabla 6.3. Parámetros utilizados por el Algoritmo Genético.

Parámetro	Valor
Tamaño de Población	30
Número de Generaciones	500
Tipo de Selección	Selección de Torneos
Tipo de Cruzamiento	Cruzamiento Uniforme
Probabilidad de Cruzamiento	50%
Probabilidad de Mutación	2%
Elitismo	Si

Como se mencionó en el capítulo 5, estos datos se escribieron en el archivo ga.inp de donde son tomados por el programa para llevar a cabo la operación del algoritmo genético. Por otra parte se introducen los datos de la configuración de la red de tuberías de desfogue de baja presión y por separado en otro archivo la correspondiente a la red de desfogue ácido, éstos datos se

presentan en las tablas 6.4 y 6.5 las cuales corresponden a los esquemas presentados en las figuras 6.2 y 6.1 respectivamente.

Tabla 6.4. Configuración de la red de tuberías de desfogue ácido del SRP de la planta HDS de Naftas (ver figura 6.2).

No. Tramo	Tramo al que descarga	Longitud (ft)	Codos 90°	Codos 45°	T rama	T flujo recto	L/D Total
1	0	37.9	2	0	0	0	60
2	1	68.3	0	0	0	1	20
3	2	41.8	3	1	0	0	106
4	2	113.2	0	0	0	1	20
5	4	46.6	3	1	0	0	106
6	4	55.3	0	0	0	1	20
7	6	34.7	3	1	0	0	106
8	6	21.6	0	0	0	1	20
9	8	46.1	3	1	0	0	106
10	8	93.3	1	0	0	0	20
11	10	80.2	1	0	0	0	20
12	11	29.8	3	1	0	0	106

Tabla 6.5. Configuración de la red de tuberías del sistema de relevo de baja presión de la planta HDS de Naftas (ver figura 6.1).

No. De Tramo	Tramo al que descarga	Longitud (ft)	Codos 90°	Codos 45°	T rama	T flujo recto	L/D Total
1	0	38	0	0	0	1	20
2	1	272.61	0	0	1	0	60
3	2	3.18	0	0	0	1	20
4	3	1.61	0	0	0	1	20
5	4	39.3	0	0	0	1	20
6	5	27.07	0	0	0	1	20
7	6	15.78	0	0	1	0	60
8	6	6.66	1	0	0	1	50
9	8	72	3	1	0	0	106
10	7	72	3	1	0	0	106
11	6	118.5	4	1	0	0	136
12	5	46	3	1	0	0	106
13	4	32.5	3	1	0	0	106
14	3	46	3	1	0	0	106
15	2	32.5	3	1	0	0	106
16	11	3	2	0	1	0	150
17	11	3	2	1	0	0	150

Las longitudes y accesorios considerados se obtuvieron mediante rutas estimadas que se consideran desde el equipo protegido hasta el cabezal principal del SRP y el tanque de desfogue correspondiente ubicándose estas trayectorias en el plano de localización general.

Por otro lado se introdujeron las características particulares de las válvulas a cada red de tuberías para llevar a cabo la optimización de la red. En las tablas 6.6 y 6.7 se presentan las características de las válvulas correspondientes al cabezal de baja presión y al de desfogue ácido.

Tabla 6.6. Características particulares de las válvulas del desfogue de baja presión de la planta HDS de Naftas (ver figura 6.1).

<i>PSV</i>	<i>PSV-1</i>	<i>PSV-2</i>	<i>PSV-3</i>	<i>PSV-4</i>	<i>PSV-5</i>	<i>PSV-6</i>	<i>PSV-7</i>	<i>PSV-8</i>
<i>Ident. del sistema</i>	15	14	13	12	12	17	10	9
<i>Flujo a Relevar [=] lb/hr</i>	2127.44	17306.1	2127.44	4761.94	7738.15	45776.3	4640.68	8754.47
<i>Temp. De relevo [=] °F</i>	426.20	426.20	426.20	226.40	395.60	395.60	314.60	460.40
<i>Pres. de relevo [=] psig</i>	111.87	111.87	111.87	58.51	65.40	62.58	206.52	154.89
<i>Diám. orif. Sal. de PSV [=] in</i>	2.0079	2.9921	2.0079	2.9921	2.9921	5.9843	2.0079	2.9921
<i>MCPP [=] Puig</i>	33.5599	33.5599	33.5599	17.5544	19.6196	18.7748	61.9567	46.468
<i>Cp [=] Btu/lbmol °R</i>	13.6589	13.6589	13.6589	9.8970	15.6980	15.6980	16.9870	13.6890
<i>K (Cp/Cv)</i>	1.0720	1.0720	1.0720	1.0860	1.0570	1.0860	1.1410	1.0780
<i>μ [=] cP</i>	0.01458	0.01458	0.01458	0.06980	0.00989	0.00989	0.00968	0.00925
<i>Joule Tompson</i>	6.8071	4.1161	6.8071	1.0167	4.5682	4.9161	1.5221	4.2916
<i>Z</i>	0.8230	0.8230	0.8230	0.8820	0.8690	0.8740	0.7550	0.7920
<i>PM</i>	109.60	109.60	109.60	78.11	114.20	81.30	78.76	116.00
<i>Tipo de válvula</i>	Balanc.	Balanc.	Balanc.	Balanc.	Balanc.	Balanc.	Balanc.	Balanc.

Tabla 6.7. Características particulares de las válvulas del desfogue ácido de la planta HDS de Naftas (ver figura 6.2).

<i>PSV</i>	<i>PSV-1</i>	<i>PSV-2</i>	<i>PSV-3</i>	<i>PSV-4</i>	<i>PSV-5</i>
<i>Ident. del sistema</i>	3	5	7	9	12
<i>Flujo a Relevar. [=] lb/hr</i>	10791.5	10791.5	36816.8	10862.1	10862.1
<i>Temp. De relevo [=] °F</i>	278.6	221.0	392.0	426.2	746.6
<i>Pres. de relevo [=] Puig</i>	101.7	65.71	219.0	125.2	1032.6
<i>Diám. orif. sal. de PSV [=] in</i>	6.0	6.0	6.0	6.0	3.0
<i>MCPP [=] Puig</i>	30.51	19.71	65.71	37.55	309.8
<i>Cp [=] Btu/lbmol °R</i>	12.569	9.658	19.256	2.569	16.589
<i>K (Cp/Cv)</i>	1.380	1.385	1.227	1.380	1.388
<i>μ [=] cP</i>	0.0789	0.0689	0.0742	0.00898	0.01598
<i>Joule Tompson</i>	2.5311	1.8079	1.2655	4.0186	1.116
<i>Z</i>	1.002	1.001	1.002	1.003	1.020
<i>PM</i>	3.44	3.45	10.9	3.0	3.0
<i>Tipo de válvula</i>	Balanc.	Balanc.	Balanc.	Balanc.	Balanc.

Los datos de configuración junto con las propiedades de las válvulas se utilizaron para calcular las redes de tuberías para los dos cabezales y se obtuvieron con base en una simulación en HISYS, para lo cual ya se disponía

previamente de estos datos de las Hojas de Datos. Estos datos se introdujeron en un archivo de texto de donde son leídos por el programa que tiene implementado el algoritmo genético que realiza la optimización siguiendo la secuencia que se presenta en el capítulo 5.

En este problema se generaron ocho archivos de datos con la configuración de tuberías y datos de las válvulas que utiliza cada falla. Tres archivos contienen la información referente a la red de tubería de desfogue de baja presión y los cinco restantes la información referente a la red de tuberías del desfogue ácido.

Otro aspecto considerado para llevar a cabo la optimización se encuentra en la función de aptitud (ecuación 5.4), definido como el peso de la penalidad, r , el cual es un parámetro heurístico y su valor depende de los resultados mas adecuados para cada tipo de configuración de la red que se esté optimizando. En la figura 6.3, se muestra el efecto de r sobre el costo de la red de tubería de baja presión debido a la falla por fuego en el área II y sobre la penalidad de caída de presión.

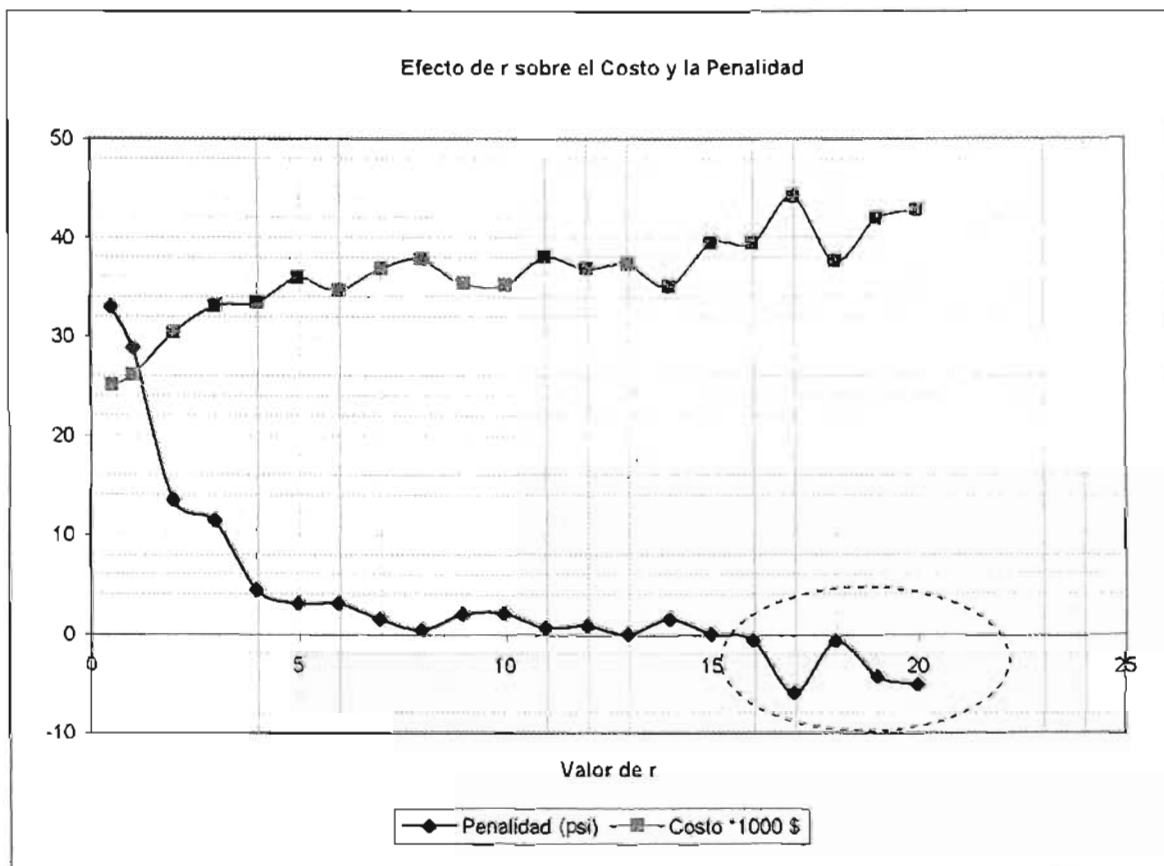


Figura 6.3. Efecto del peso de la penalidad, r , sobre el Costo de la red y la penalidad.

En la figura anterior se observa que el costo se incrementa en forma proporcional al incremento del valor de r mientras que la penalidad disminuye conforme aumenta el valor de r , además se observa que en la zona punteada los valores de penalidad, son negativos esto quiere decir que en esta zona no existen violaciones en la caída de presión, por lo que el valor de r se selecciona entre los valores que se encuentran en esta zona. El valor más adecuado de r es aquel para el cuál la penalidad sea muy cercana o igual a cero.

En el caso de estudio se observó que este parámetro se encuentra en un rango de 0 a 20, el cual fue considerado para seleccionar el valor de r utilizado para llevar a cabo la optimización de las redes de tuberías correspondientes a cada una de las fallas consideradas en cada cabezal (cabezal de baja presión y cabezal de desfogue ácido).

El tipo de tubería utilizado en la evaluación de costos es de acero al carbón ASTM – A53B/A106B cedula 40 y los precios se obtuvieron de la empresa Tubos de Acero de México S. A. (TAMSA) y están establecidos en pesos por metro (\$/m) vigentes al 1 de octubre de 2003, sin embargo para efectos de este estudio se obtuvo el precio por pie de longitud (\$/ft).

6.4. Resultados Obtenidos.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos a partir del algoritmo genético. También se muestran resultados para las redes usando el programa Desfogue del IMP, el cual no considera optimización de los diámetros, esto con la finalidad de comparar los resultados generados (diámetros y costos obtenidos) por cada programa para cada red de tuberías analizada.

Los valores en negritas en la tabla 6.8, 6.10, 6.12 y 6.14 indican el porcentaje de diferencia entre la caída de presión permisible y la caída de presión calculada en cada trayectoria válvula – quemador.

En la tabla 6.8 se muestran los diámetros obtenidos mediante el algoritmo genético para los tramos involucrados en las fallas presentes en la red de tuberías de baja presión. Además se presenta el porcentaje de diferencia entre la caída de presión disponible y del sistema para cada trayectoria válvula-tanque de desfogue, esto con la finalidad de observar la aproximación que existe entre la caída de presión disponible y la caída de presión calculada para el sistema, ya que entre mas próximas estén, se garantiza que los diámetros son los mínimos que pueden obtenerse y que no violan las restricciones de caída de presión y con ello el costo total de la red se reduce.

Tabla 6.8. Diámetros generados por cada falla, y diámetros finales de la red de baja presión mediante el algoritmo genético.

No. Tramo	FALLAS					
	Fuego área I		Fuego área II		Reflujo	
	D (in)	% Dif (ΔP)	D (in)	% Dif (ΔP)	D (in)	% Dif (ΔP)
1	5.043		6.025		7.981	
2	3.068		5.043		7.981	
3	5.043		6.025		7.981	
4	1.610		6.025		7.981	
5			7.981		7.981	
6			5.043		7.981	
7			3.068			
8			1.610			
9			3.068	15.43		
10			1.610	22.61		
11			4.026		7.981	
12			3.068	-0.01		
13	1.610	4.14				
14	4.026	0.69				
15	1.610	5.32				
16			5.043	0.75		
17					11.941	7.96
%Dif Promedio		3.4		9.7		7.96

En esta tabla se observa que los diámetros de la configuración de la red están dominados por la falla de reflujo ya que en esta se presentan los diámetros de mayor dimensión. Además se observa que en los tramos 3 y 4 para la falla de reflujo se obtienen diámetros mayores en comparación con los demás tramos involucrados en esta falla, sin embargo no tienen un gran efecto en el costo total de la red, esto se debe a que el algoritmo genético no los modifica sustancialmente y se mantienen a través de las generaciones ya que la longitud de estos tramos es pequeña en comparación con las longitudes de los demás tramos y por consiguiente la caída de presión presente en éstos es de poca influencia en la determinación de la caída de presión total del sistema.

En la tabla 6.9 se muestran los diámetros finales de la red de tuberías a partir de los datos presentados en la tabla anterior, así como el costo obtenido para la configuración final de la red de desfogue de baja presión, en donde se consideraron los diámetros nominales para cada tramo así como sus longitudes.

Tabla 6.9. Costo final de la red de tubería de baja presión obtenido mediante el algoritmo genético.

Tramo	Diam. Int. (in)	Diam. nom. (in)	Longitud (ft)	Costo (\$)
1	7.981	8	38	4272
2	7.981	8	272	30579
3	7.981	10	3.2	360
4	7.981	10	1.6	180
5	7.981	8	39	4385
6	7.981	8	27.1	3047
7	3.068	3	15.8	549
8	1.61	1.5	39.3	864
9	2.467	2.5	72	2156
10	1.61	1.5	72	1583
11	7.981	8	118.5	13322
12	3.068	3	46	1598
13	1.61	1.5	32.5	715
14	4.026	4	46	2113
15	1.61	1.5	32.5	715
16	6.025	6	3	225
17	11.941	12	3	641
Costo total de la red de tuberías =				67304

Con respecto a los diámetros obtenidos mediante el algoritmo genético para red de tuberías de desfogue ácido, en la tabla 6.10 se muestran los diámetros generados por cada falla en la red de desfogue ácido; en la tabla 6.11 se muestra el costo total de la red considerado diámetros nominales.

Tabla 6.10. Diámetros generados por cada falla, y diámetros finales de la red de desfogue ácido mediante el algoritmo genético.

No. Tramo	FALLAS									
	Flujo inverso 1		Flujo inverso 2		Flujo inverso 3		Flujo Inverso 4		Flujo inverso 5	
	D (in)	% Dif (ΔP)	D (in)	% Dif (ΔP)	D (in)	% Dif (ΔP)	D (in)	% Dif (ΔP)	D (in)	% Dif (ΔP)
1	6.025		6.025		6.025		6.025		3.068	
2	5.043		6.025		6.025		6.025		2.467	
3	6.025	8.07								
4			6.025		6.025		6.025		2.467	
5			6.025	16.83						
6					7.981		6.025		3.068	
7					7.981	4.49				
8							6.025		3.068	
9							6.025	0.79		
10									3.068	
11									3.068	
12									3.068	1.32
%Dif Promedio	8.07		16.83			4.49		0.79		1.32

Tabla 6.11. Costo final de la red de tubería de desfogue ácido obtenido mediante el algoritmo genético.

Tramo	Diam. Int. (in)	Diam. nom. (in)	Longitud (ft)	Costo (\$)
1	6.025	6	37.9	2837
2	6.025	6	68.3	5112
3	6.025	6	41.8	3129
4	6.025	6	113.2	8473
5	6.025	6	46.6	3488
6	7.981	8	55.3	6217
7	7.981	8	34.7	3901
8	6.025	6	21.6	1617
9	6.025	6	46.1	3450
10	3.068	3	93.3	3241
11	3.068	3	80.2	2786
12	3.068	3	29.8	1035
Costo total de la red de tuberías =				45285

En lo que respecta a las evaluaciones con el programa Desfogue del IMP, el cual utiliza los mismos datos de configuración y propiedades de las válvulas (tablas 6.4 a 6.7), los resultados obtenidos correspondientes a la red de baja presión se muestran en las tablas 6.12 y 6.13.

Tabla 6.12. Diámetros generados por cada falla, y diámetros finales de la red de baja presión mediante el programa DESFOGUE.

No. Tramo	FALLAS					
	Fuego área I		Fuego área II		Reflujo	
	D (in)	% Dif (ΔP)	D (in)	% Dif (ΔP)	D (in)	% Dif (ΔP)
1	4.026		6.025		7.981	
2	4.026		6.025		7.981	
3	3.068		4.026		7.981	
4	1.61		4.026		7.981	
5			4.026		7.981	
6			4.026		7.981	
7			2.067			
8			2.067			
9			2.067	12.68		
10			1.61	35.66		
11			4.026		7.981	
12			2.469	0.06		
13	1.049	1.72				
14	3.068	15.30				
15	1.049	4.34				
16			2.469	0.0		
17					6.023	21.60
%Dif Promedio		7.12				21.60

En esta tabla se presentan, al igual que en los resultados mostrados en el cálculo con el algoritmo genético, los diámetros de los tramos que están involucrados en cada falla, así como el porcentaje de diferencia entre la caída de presión permisible (o disponible) para cada trayectoria y la caída de presión calculada.

Como se puede observar en los resultados, los diámetros obtenidos a partir del algoritmo genético, resultan ser ligeramente mayores en comparación con los obtenidos con el programa Desfogue (ver figura 6.4), una de las causas que ocasionaron esto es que las ecuaciones de caída de presión utilizadas por cada programa son diferentes, aunque en ambas se considera régimen isotérmico. Sin embargo, también se observa que el promedio del porcentaje de diferencias que se obtuvieron para cada falla resultan ser menores en el cálculo realizado mediante el algoritmo genético en comparación con el programa Desfogue (ver figura 6.5), lo que implica que el cálculo con el algoritmo genético busca en realidad reducir las diferencias entre la caída de presión disponible y la caída de presión calculada llevando así la optimización del costo final de la red de tuberías pero para este caso los resultados obtenidos se vieron más afectados por el cálculo de caída de presión.

En la tabla 6.13 se presenta el costo final de la red de tuberías de baja presión considerándose diámetros nominales a partir de los resultados obtenidos por el programa Desfogue.

Tabla 6.13. Costo final de la red de tubería de baja presión obtenido mediante el programa Desfogue.

Tramo	Diam. Int. (in)	Diam. nom. (in)	Longitud (ft)	Costo (\$)
1	7.981	8	38	4272.1
2	7.981	8	272	30579.4
3	7.981	8	3.2	359.8
4	7.981	8	1.6	179.9
5	7.981	8	39	4384.6
6	7.981	8	27.1	3046.7
7	2.067	2	15.8	406.0
8	2.067	2	39.3	1009.9
9	2.067	2	72	1850.2
10	1.61	1.5	72	1583.3
11	7.981	8	118.5	13322.3
12	2.469	2.5	46	1377.5
13	1.049	1.5	32.5	714.7
14	3.068	3	46	1597.8
15	1.049	1	32.5	611.8
16	2.469	2.5	3	89.8
17	6.025	6	3	224.5
Costo total de la red de tuberías =				65610.3

En esta tabla el costo final de la red de tuberías de baja presión resulta ser menor que el obtenido en el cálculo con el algoritmo genético, ya que se obtienen diámetros menores en algunos tramos esto debido principalmente a los diferentes métodos cálculo de la caída de presión.

En lo referente a los resultados obtenido con el programa desfogue para la red de desfogue ácido se muestran en las tablas 6.14 y 6.15.

En la tabla 6.14, se muestran los diámetros obtenidos para cada falla y se procede de la misma forma que se usa con el Algoritmo Genético para obtener los diámetros de la configuración final de la red. En esta tabla, se observa que los diámetros, comparados con los obtenidos por el algoritmo genético son mayores debido a que en el cálculo con el algoritmo genético existe mayor reducción de los diámetros en la mayoría de las fallas, esto se debe a que los porcentajes de diferencias promedio resultan ser más pequeños (ver figura 6.6 y 6.7).

Tabla 6.14. Diámetros generados por cada falla, y diámetros finales de la red de desfogue ácido mediante el programa DESFOGUE.

No. Tramo	FALLAS									
	Flujo inverso 1		Flujo inverso 2		Flujo inverso 3		Flujo inverso 4		Flujo inverso 5	
	D (in)	% Dif (ΔP)	D (in)	% Dif (ΔP)	D (in)	% Dif (ΔP)	D (in)	% Dif (ΔP)	D (in)	% Dif (ΔP)
1	6.025		7.981		7.981		6.025		6.025	
2	6.025		7.981		7.981		6.025		4.026	
3	6.025	36.7								
4			7.981		6.025		6.025		3.068	
5			6.025	11.4						
6					6.025		6.025		2.469	
7					6.025	14.2				
8							6.025		2.469	
9							6.025	15.2		
10									2.469	
11									2.469	
12									2.469	2.62
% Dif Promedio	36.7		11.4		14.2		15.2			2.62

En la tabla 6.15 se presentan la configuración final y el costo total de la red considerándose para ello los diámetros nominales de cada tramo.

Tabla 6.15. Costo final de la red de tubería de desfogue ácido obtenido mediante el programa DESFOGUE.

Tramo	Díam. Int. (in)	Díam. nom. (in)	Longitud (ft)	Costo (\$)
1	7.981	8	37.9	4260.9
2	7.981	8	68.3	7678.6
3	6.025	6	41.8	3128.6
4	7.081	8	113.2	12726.4
5	6.025	6	46.6	3487.9
6	6.025	6	55.3	4139.1
7	6.025	6	34.7	2597.2
8	6.025	6	21.6	1616.7
9	6.025	6	46.1	3450.5
10	2.469	2.5	93.3	2793.8
11	2.469	2.5	80.2	2401.6
12	2.469	2.5	29.8	892.4
Costo total de la red de tuberías =				49173.8

Se puede observar en la tabla 6.15 que el costo total obtenido para la configuración es mayor que el calculado por el algoritmo genético el cual es 8% menor al obtenido mediante el programa Desfogue. Es importante mencionar que esta comparación se hace con la salvedad de que la ecuación utilizada para el cálculo de caída de presión para el algoritmo genético es diferente a la utilizada por el programa Desfogue.

Para observar con mas detalle los aspectos comentados en esta sección puede consultarse las tablas que se presentan en el Anexo A de esta tesis.

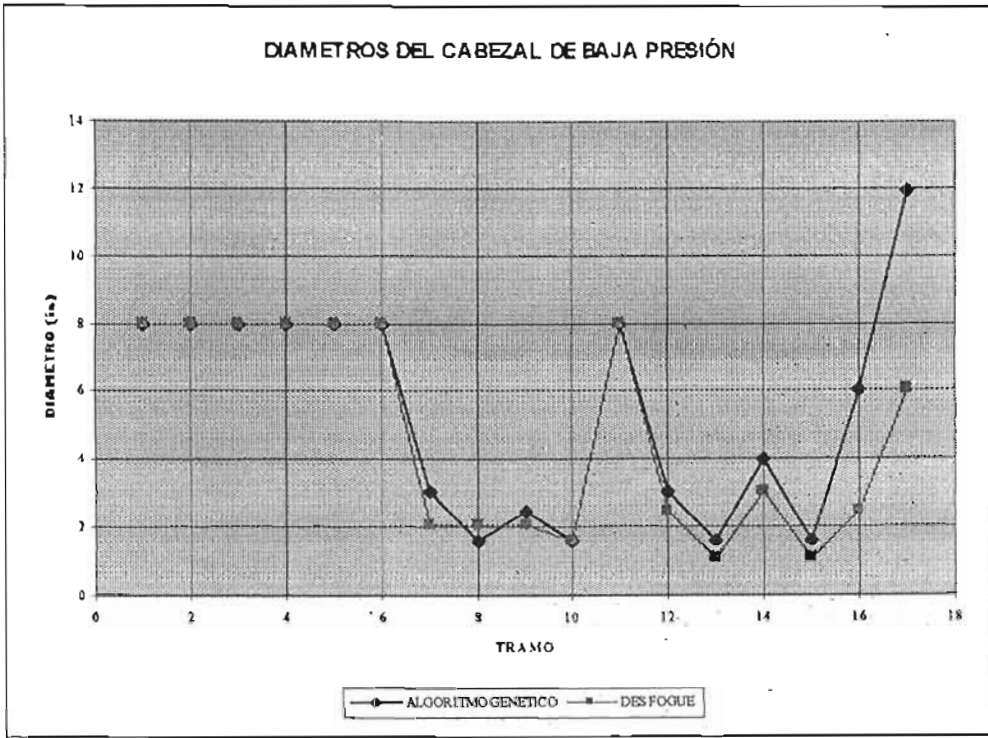


Figura 6.4. Diámetros de la red de tuberías del desfogue de baja presión obtenidos por los programas: Algoritmo Genético y Desfogue.

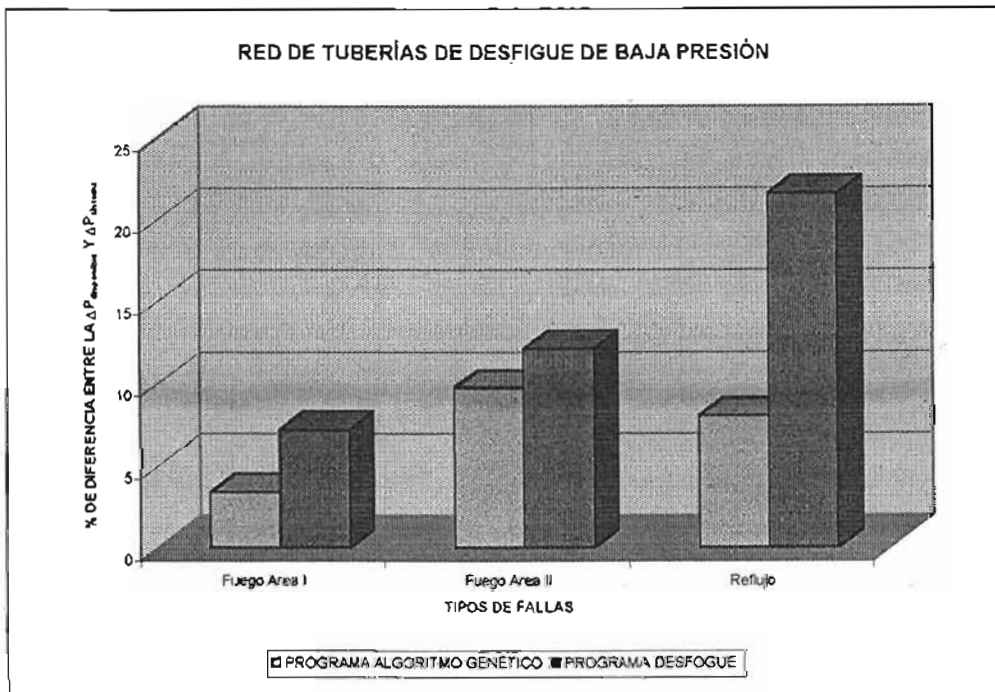


Figura 6.5. Porcentajes promedio de diferencias entre $\Delta P_{disponible}$ y $\Delta P_{sistema}$ para cada una de las fallas presentes en la red de tuberías de baja presión.

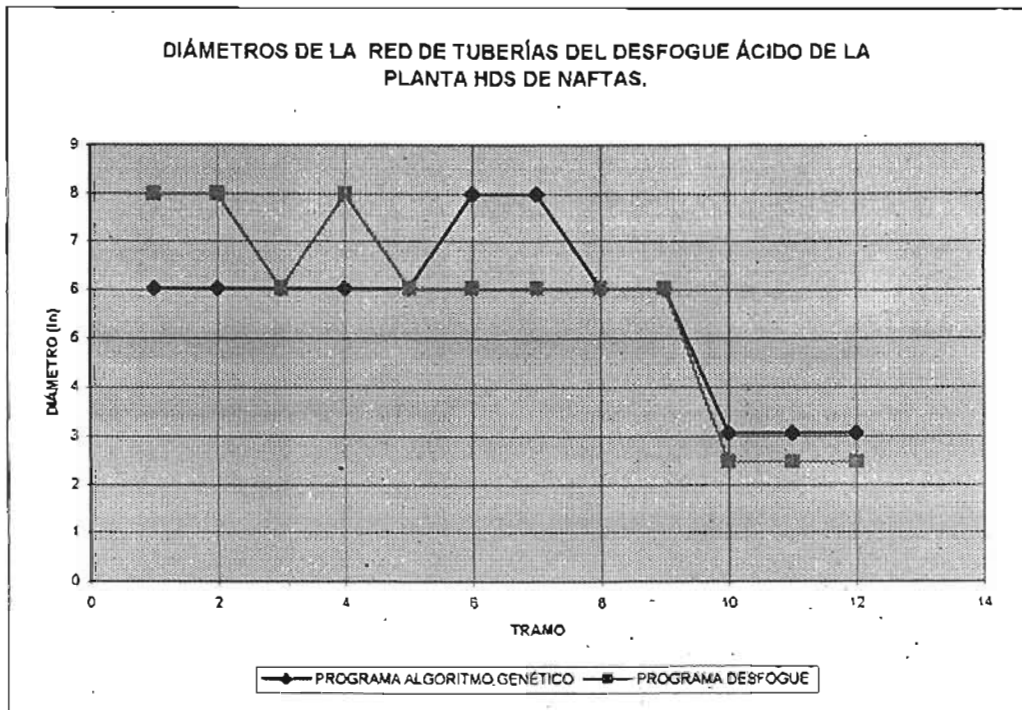


Figura 6.6. Diámetros de la red de tuberías del desfogue ácido obtenidos por los programas: Algoritmo Genético y Desfogue.

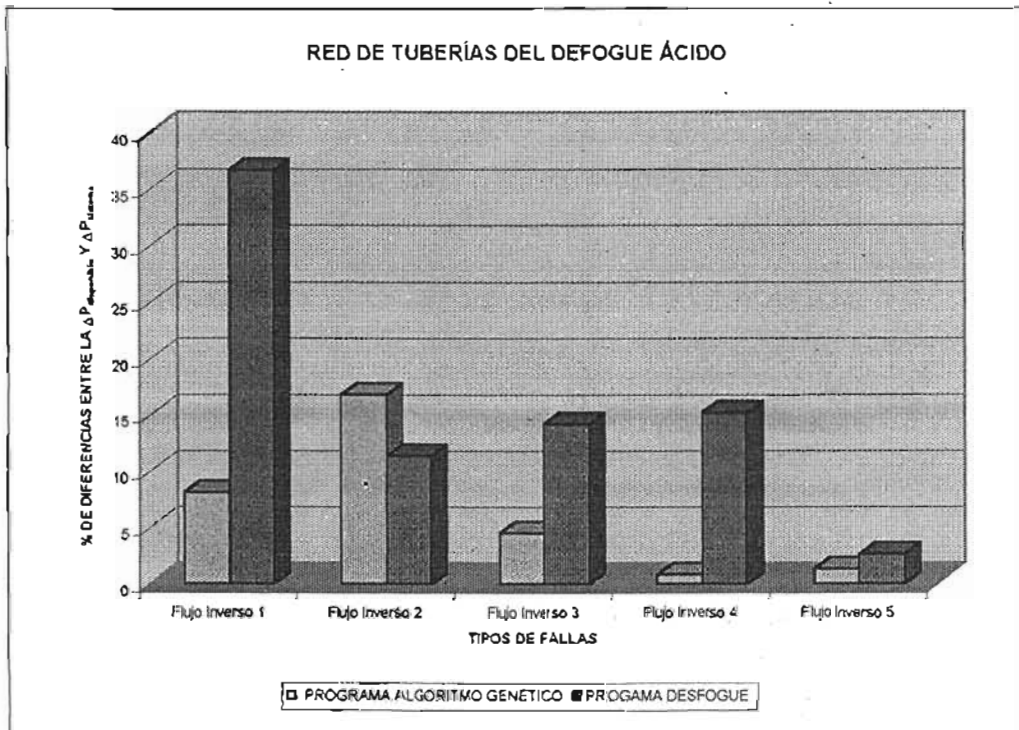
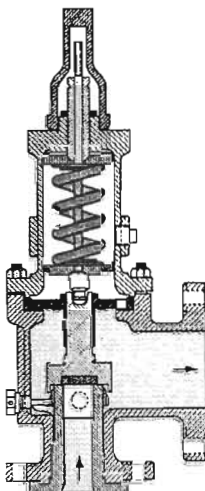
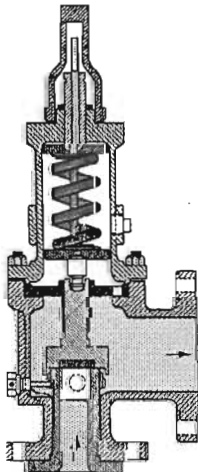


Figura 6.7. Porcentajes promedio de diferencias entre $\Delta P_{disponible}$ y $\Delta P_{sistema}$ para cada una de las fallas presentes en la red de tuberías de desfogue ácido.



CONCLUSIONES.



CONCLUSIONES.

El diseño de los sistemas de relevo de presión es una tarea bastante compleja y optimizar una red de fluidos compresible lo es aún más; el presente trabajo presenta una alternativa para diseñar y optimizar SRP la cual es bastante robusta y no requiere de la evaluación analítica o numérica inicial de diferenciales para encontrar la solución a dicho problema. Para llevar a cabo la optimización de la red de tuberías del SRP se deben establecer en principio las bases para su evaluación, en consecuencia esta tesis considera régimen permanente, así como temperatura constante en cada tramo de la configuración; además del cálculo de la caída de presión con base en la ecuación de Conison en la cual considera flujo isotérmico. Las propiedades de los fluidos relevados, se calculan mediante reglas simples de mezclado presentadas en el capítulo 3 en la sección 3.2.2.1 y se consideran como fase previa de ingeniería, el predimensionamiento de los DRP y la evaluación de las propiedades termodinámicas a condiciones de relevo.

El método de optimización utilizado fue un algoritmo genético el cual ya se ha mencionado es bastante robusto y tiene como fundamento la selección natural que se lleva en la evolución natural de las especies, dicho algoritmo se implementó en un programa computacional desarrollado en lenguaje Fortran 90, entre las características principales del mismo encontramos la utilización de operador de elitismo, cruzamiento uniforme y la selección de la población reproductiva mediante torneos.

La optimización fue aplicada a la red de tuberías del SRP de la planta Hidrodesulfuradora de Naftas de Coquización de Minatitlán, Veracruz, por efectos prácticos se realizó solo el cálculo de la red de desfogue de baja presión y el de la red de desfogue ácido, debido a que el cálculo de la red restante se realiza de manera similar.

Con base a los resultados obtenidos, al analizar el método de optimización empleando algoritmos genéticos y el método convencional empleado en la fase de ingeniería conceptual, se desprenden las siguientes conclusiones:

El parámetro heurístico, r , considerado en la función de aptitud, tiene un efecto considerable sobre los costos y las violaciones de caída de presión, por ello el valor utilizado de este parámetro debe ser el más adecuado dependiendo de cada configuración que se este calculando, es decir, aquel valor que no permita que se excedan las restricciones de caída de presión cuidando que no se eleve demasiado el costo. Los valores de r utilizados para determinar los diámetros de los tramos de tubería involucrados en las fallas presentes en cada red de tubería, fueron encontradas en un rango de 0 a 20, esto debido a que en cada configuración se encontró un valor de r adecuado dentro de este rango.

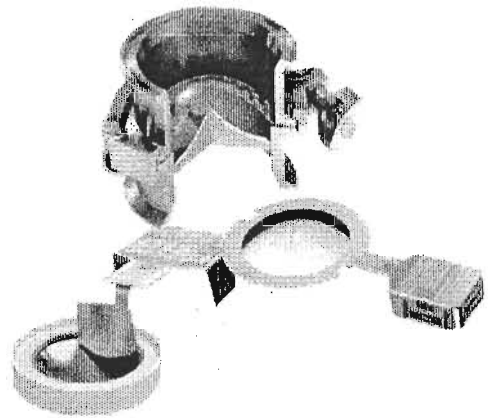
La solución con el algoritmo genético ofrece la ventaja de presentar un proceso matemático menos complejo que otros métodos de optimización y proporciona resultados aceptables, por lo que pueden ser utilizados para realizar la optimización de la red de tuberías del sistema de relevo de presión. Cabe mencionar que existen diversos métodos de optimización que pueden usarse para llevar a cabo la optimización de redes de tuberías del SRP, por lo que el trabajo desarrollado solo plantea una alternativa más para realizar la solución de este tipo de problemas.

Cabe mencionar que casi nunca se puede estar completamente seguro de que el resultado entregado por el algoritmo genético sea el máximo o el mínimo global, o cuando se debe detener el proceso de búsqueda.

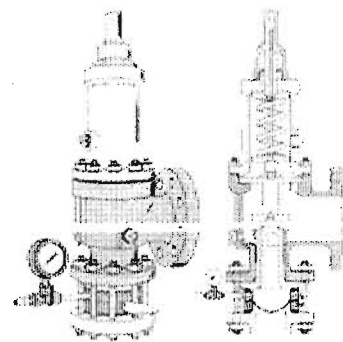
Consideramos que el campo referente a la optimización y la investigación de operaciones en general, es inmenso y queda mucho por investigar y descubrir al respecto, el presente trabajo fácilmente se puede extender a un sinnúmero de aplicaciones específicas en ingeniería que pueden ser explotadas, e incrementadas en su contexto global. En lo referente de manera específica a la optimización del SRP queda mucha trabajo a desarrollar y mayor cantidad de consideraciones válidas a establecer, y en consecuencia desarrollar mejores aproximaciones en el cálculo global.

Consideramos en general que los objetivos principales planteados en un origen fueron cumplidos, de una forma satisfactoria.

Dejamos, pues; abierto el estudio para soluciones aun más complejas de las que se analizaron aquí y métodos de cálculo más sofisticados que proporcionen una visión distinta en los resultados.



BIBLIOGRAFÍA.



BIBLIOGRAFÍA.

1. Alfaro Pastor E., Gómez Rodríguez J.L., *Optimización de Sistemas de Desfogue*, Subdirección de Ingeniería de Proyectos de Plantas Industriales del IMP, Vol. XXI, Num. 1, 1990, enero-marzo, pp. 53-56. México.
2. Alfaro Pastor E., Malacara Alvarado R., *Modelo a régimen no permanente para el cálculo de sistemas de relevo de presión*, Facultad de Ingeniería Química UNAM, 1980.
3. American Petroleum Institute, *API Recommended Practice 520, Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries, Part I, Sizing and Selection*, sixth edition, march, 1993.
4. American Petroleum Institute, *API Recommended Practice 520, Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries, Part II, Installation*, fourth edition, december, 1994.
5. American Petroleum Institute, *API Recommended Practice 521, Guide for Pressure-Relieving and Depresuring Systems*, fourth Edition, march, 1997
6. American Petroleum Institute, *API Standard 526, Flanged Steel Pressure Relief Valves*, fourth edition, june, 1995.
7. American Society of Mechanical Engineers, ASME, B31.3, *Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping*, ed. 1990. New York, USA.
8. Armitano O., Edelman J., Palomares G. U., *Programación No Lineal*, Ed. Limusa, 1ra ed., 1985, México.
9. Beasley D., D. Bull y R. Martín, *An Overview of Genetic Algorithms: Part 1, Fundamentals*, University Computing, 15(2), 1993, pp. 58-69.
10. Beasley D., D. Bull y R. Martín, *An Overview of Genetic Algorithms: Part 2, Research Topics*, University Computing, 15(4), 1993, pp. 170-181.
11. Betoni, A., y M. Dorigo, *Implicit Parallelism in Genetic Algorithms*, Artificial Intelligence, 1993, No. 61, pp. 307-314.
12. Biegler, L.T., et. al., *Systematic Methods of Chemical Process Design*, Carnegie Mellon University, Editorial Prentice Hall PTR, 1997, pp. 748-769.

13. Cardoso M.F., et. al., *Nonequilibrium simulated annealing: a faster approach to combinatorial minimization*, Industrial Engineering Chemistry Research 33, 1994, pp.1908-1918.
14. Cheng W.B. y Mah R.S.H., *Optimal Design of Pressure relieving piping networks by discrete merging*, American Institute of Chemical Engineers Journal 22, 1976, pp. 471-476.
15. Conison J., *How to design a Pressure Relief Systems*, Chemical Engineering, 1960, July 25, pp. 109-114.E.U.A.
16. Conison J., *How to Size Vapor-Relieving Systems-1*, The Oil and Gas Journal, 1954, March 8, pp. 119-120.
17. Conison J., *How to Size Vapor-Relieving Systems-3*, The Oil and Gas Journal, 1954, March 29, pp. 123.
18. Costa André L. H., et. al., *Optimal Design of Pressure Relief Header Networks via Genetic Algorithms*, II Congreso de Engenharia de Processos do Mercosul, 1999, 30 de agosto a 02 de Septiembre, Florianópolis-Santa Catarina-Brasil.
19. Costa André L. H., et. al., *Optimization of Pressure Relief Header Networks: a Linear Programming Formulation*, Computers Chemical Engineering 24, 2000, 31 January, pp. 153-156.
20. Costa André L. H., et. al., *Steady-state modeling and simulation of pipeline networks for compressible fluids*, Brazilian J. of Chem. Eng. 4, 1998, pp. 344-357.
21. Crane, *Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*, 2da ed., McGraw Hill, 1992. México.
22. Crocker Sabin & Walter J.H., *Piping Handbook*, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York, USA, 1945, pp. 257-269.
23. Fitzpatrick, J. M. y J. Grefensette, *Genetic Algorithms in Noisy Environments*, Machine Learning No. 3, 1988, pp. 101-120.
24. Goldberg D. E., *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison Wesley Publishing Co, Reading Mass, 1989.
25. Gómez Rodríguez J.L., *Optimización de los Sistemas de Relevo de Presión y Quemadores*, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM, 2001, julio. México.

BIBLIOGRAFÍA.

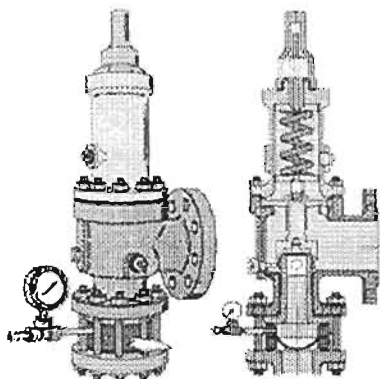
26. Han S. P., *Superlinealy convergent variable metric algorithms for general nonlinear programming problems*, 1976, *Mathematical Programming*, 11, pp. 263-282.
27. Hiller F. S. and Lieberman G. J., *Introduction to Operations Research*, 1986, Editorial Holden Day, San Francisco.
28. Holland J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 1a ed., MIT Press, 1975.
29. Holland J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 2a ed., MIT Press, 1992.
30. Instituto Mexicano del Petróleo, *Instructivo interno de Trabajo, Perfil de Temperaturas*, 1985.
31. Instituto Mexicano del Petróleo, *Instructivo interno de Trabajo, Sistema de Desfogue*, 1985.
32. Instituto Mexicano del Petróleo, *Planta de Hidrodesulfuración de Naftas de Coquización*, patente. México.
33. Isaacs M., *Pressure-Relief Systems*, *Chemical Engineering*, 1971, February 22, pp. 113-124. New York, USA.
34. Jenett E., *Components of Pressure-Relieving Systems*, *Chemical Engineering*, 1963, August 19, pp. 151-158, New York, USA.
35. Kern Robert, *How to Compute Pipe Size*, *Chemical Engineering*, 1975, January 6, pp. 115-120.
36. Kern Robert, *How to Size Piping and Components as gas expands at flow conditions*, *Chemical Engineering*, 1975, October 13, pp. 125-132.
37. Koza J.R., *Genetic Programming. On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, The MIT Press, 1992, pp. 819.
38. Machiavelo Victor, *Calculo del Nivel de Integridad de Seguridad de Acuerdo a la IEC 61508 e ISA 84-01*, Sociedad de Instrumentistas de América Sección México A.C., Curso de Sistemas de Seguridad ISA 2001.
39. Make Henry Y., *New Method Speeds Pressure-Relief Manifold Design*, *The Oil and Gas Journal*, 1978, November 20, pp. 166-172.

40. Missen R.W., *Pressure Drop in Vapor-Relief Systems*, Chemical Engineering, 1962, October 29, pp. 101-102.
41. Murtagh B. A., *An Approach to the Optimal Design of Networks*, Chemical Engineering Science, vol. 77, 1972, pp. 1131-1141. Great Britain.
42. Murtagh B. A. and Saunders M. A., *A projected lagrangian algorithm and its implementation for sparse nonlinear constraints*, Mathematical Programming Study, 16, 1982, pp. 84-117.
43. Murtagh B. A. and Saunders M. A., *Large-scale linearly constrained optimization*, Mathematical Programming, 14, 1978, pp.41-72.
44. Nemhauser G.L. and Wolsey L. A., *Integer and Combinatorial Optimization*, 1988, New York: Wiley
45. Noriega G. Eduardo, *Seminario de Principios Básicos de los Sistemas de Seguridad*, Triconex (an Invensys Company)-México, 13 y 14 de 2003.
46. Powell M.J.D., *A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculation*, In Numerical Analysis, Dundee, Lecture Notes in Mathematics 630, Editorial G. A. Watson, 1978.
47. Reid Robert C., Prausnitz John M. & Poling Bruce E., *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill, Fourth Edition, U.S.A., 1987
48. Reklaitis G.V. Schneider D.R., *Balances de Materia y Energía*, 2da ed. Editorial McGraw-Hill, México, 1989.
49. Reklaitis G. V., et al., *Engineering Optimization*. First edition, John Wiley & Sons Inc., New York, USA, 1983.
50. Rodríguez Marín J., Alfaro Pastor E., *Comparación Mediante Simulación de 5 Ecuaciones Recomendadas para Calculo de Cabezales de Desfogue*, XIX Convención Nacional de Ingenieros Químicos, Noviembre 1979.
51. Secretaria de Comercio y Fomento. Norma Oficial Mexicana, NOM-093-SCFI. *Válvulas de relevo de presión (seguridad, seguridad-alivio y alivio) operadas por resorte y piloto; fabricadas de acero y bronce*. Diario Oficial de la Federación, Martes 8 de diciembre.
52. Simon H., Thompson J., *Relief Systems Optimization*, Chemical Engineering, May, 1972, pp.52-58.

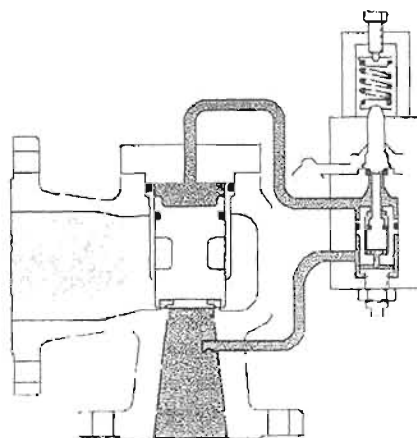
53. Steshko N., *How to Size Relief-Valve Discharge Headers-2*, The Oil and Gas Journal, 1956, March 19, pp. 265-266. USA.
54. Syswerda G., *Uniform Crossover in Genetic Algorithms*, en Schaffer, D. (editor), *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, George Mason University, Morgan Kaufmann Publishers, 1989, pp. 2-9.
55. Villar Marín V. H., *Desarrollo de un Simulador para Sistemas de Relevo de Presión en Plantas de Proceso considerando las variaciones de temperatura y el cálculo de propiedades termodinámicas SIMSRP*, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas IPN, 2001, septiembre, México.
56. Whitley D., *A Genetic Algorithm Tutorial*, Technical Report CS-93-103, Computer Science Department, Colorado State University, 1993.
57. Wolfe P., *Notes to accompany lectures, NATO Summer School on Integer and Nonlinear Programming*. Bandol, France 1969.

Referencias Electrónicas

58. Kuri A., Galaviz J., *Algoritmos Genéticos*, pateame@ciencias, 2001, 24 mayo, <http://pateame.fciencias.unam.mx/ag/index.html>
59. Pacheco C. Marco A., *Notas de Aula em Computacao Evolucionária*, www.ica.ele.pucrio.br
60. *Algoritmos Genéticos*, 2003, 26 octubre.
<http://eddyalfaro.galeon.com/geneticos.html>
61. Merelo Cuervos J. J., *Informática evolutiva: Algoritmos Genéticos*, 2004, 10 enero, <http://geneura.ugr.es/~jmerelo>



ANEXOS.



ANEXO A.

Tablas de resultados generadas mediante el Algoritmo Genético para las fallas presentes en el la red de tuberías de baja presión del SRP de la planta HDS de Naftas de Coquización en la Refinería de Minatitlán, Veracruz.

Tabla A.1. Diámetros generados mediante el Algoritmo Genético para la falla de fuego en el área I del cabezal de baja presión de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	5.043	6.5406	0	0	0
2	3.068	29.8902	0	0	0
3	5.043	30.0547	0	0	0
4	1.61	30.242	0	0	0
13	1.61	32.3776	28.56	27.3776	4.14
14	4.026	33.3632	28.56	28.3632	0.69
15	1.61	32.0411	28.56	27.0411	5.32

Tabla A.2. Diámetros generados mediante el Algoritmo Genético para la falla de fuego en el área II del cabezal de baja presión de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	7.981	5.3065	0	0	0
2	5.043	15.3889	0	0	0
3	6.025	15.6108	0	0	0
4	6.025	15.8053	0	0	0
5	6.025	16.6048	0	0	0
6	5.043	17.4828	0	0	0
7	3.068	18.7033	0	0	0
8	1.610	31.8612	0	0	0
9	2.467	40.0724	41.47	35.0724	15.43
10	1.61	49.0799	56.96	44.0799	22.61
11	4.026	19.4078	0	0	0
12	3.068	17.6774	12.55	12.6774	-0.01
16	6.025	19.5099	14.62	14.5099	0.75

Tabla A.3. Diámetros generados mediante el Algoritmo Genético para la falla de reflujo del cabezal de baja presión de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	7.981	6.2013	0	0	0
2	7.981		0	0	0
3	7.981		0	0	0
4	7.981	11.9961	0	0	0
5	7.981	12.9744	0	0	0
6	7.981	13.7075	0	0	0
11	7.981	17.3794	0	0	0
17	11.941	17.6783	13.7748	12.6783	7.9602

Tablas de resultados generadas mediante el Algoritmo Genético para las fallas presentes en el la red de tuberías de desfogue ácido del SRP de la planta HDS de Naftas de Coquización en la Refinería de Minatitlán, Veracruz.

Tabla A.4. Diámetros generados mediante el Algoritmo Genético para la falla de flujo inverso 1 del cabezal de desfogue ácido de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(In)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	6.025	10.5129	0	0	0
2	5.043	22.8634	0	0	0
3	6.025	28.4508	25.51	23.4508	8.07

Tabla A.5. Diámetros generados mediante el Algoritmo Genético para la falla de flujo inverso 2 del cabezal de desfogue ácido de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	6.025	7.5903	0	0	0
2	6.025	10.3872	0	0	0
4	6.025	14.2842	0	0	0
5	6.025	17.2343	14.71	12.2343	16:83

Tabla A.6. Diámetros generados mediante el Algoritmo Genético para la falla de flujo inverso 3 del cabezal de desfogue ácido de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diámetro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	6.025	19.904	0	0	0
2	6.025	36.9162	0	0	0
4	6.025	57.035	0	0	0
6	7.981	59.4413	0	0	0
7	7.981	62.9813	60.71	57.9813	4.49

Tabla A.7. Diámetros generados mediante el Algoritmo Genético para la falla de flujo inverso 4 del cabezal de desfogue ácido de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diámetro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	6.025	10.9555	0	0	0
2	6.025	17.4282	0	0	0
4	6.025	25.8991	0	0	0
6	6.025	29.9953	0	0	0
8	6.025	31.8824	0	0	0
9	6.025	37.2942	32.55	32.2942	0.79

Tabla A.8. Diámetros generados mediante el Algoritmo Genético para la falla de flujo inverso 5 del cabezal de desfogue ácido de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diámetro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	3.068	31.2953	0	0	0
2	2.467	152.4467	0	0	0
4	2.467	267.5483	0	0	0
6	3.068	274.7796	0	0	0
8	3.068	277.9728	0	0	0
10	3.068	289.5295	0	0	0
11	3.068	299.2597	0	0	0
12	3.068	305.7692	304.78	300.7692	1.32

Tablas de resultados generadas mediante el Programa Desfogue para las fallas presentes en el la red de tuberías de baja presión del SRP de la planta HDS de Naftas de Coquización en la Refinería de Minatitlán, Veracruz.

Tabla A.9. Diámetros generados mediante el programa Desfogue para la falla de fuego en el área I del cabezal de baja presión de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	4.026	7.69	0	0	0
2	4.026	20.23	0	0	0
3	3.068	21.17	0	0	0
4	1.61	21.28	0	0	0
13	1.049	33.07	28.56	28.07	1.72
14	3.068	29.19	28.56	24.19	15.30
15	1.049	32.32	28.56	27.32	4.34

Tabla A.10. Diámetros generados mediante el programa Desfogue para la falla de fuego en el área II del cabezal de baja presión de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	6.025	5.57	0	0	0
2	6.025	8.95	0	0	0
3	4.026	9.76	0	0	0
4	4.026	10.4	0	0	0
5	4.026	13.98	0	0	0
6	4.026	15.36	0	0	0
7	2.067	24.82	0	0	0
8	2.067	30.85	0	0	0
9	2.067	41.21	41.47	36.21	12.68
10	1.61	41.65	56.96	36.65	35.66
11	4.026	16.28	0	0	0
12	2.469	16.75	12.55	11.75	0.06
16	2.469	19.62	14.62	14.62	0.00

Tabla A.11. Diámetros generados mediante el programa Desfogue para la falla de reflujo del cabezal de baja presión de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(in)	Presión (psig)	DPdisp (psi)	DPsist (psi)	% Entre la Dpdisponible y DPsisistema
1	7.981	5.67	0	0	0
2	7.981	9.43	0	0	0
3	7.981	9.59	0	0	0
4	7.981	9.73	0	0	0
5	7.981	13.27	0	0	0
6	7.981	10.67	0	0	0
11	7.981	12.54	0	0	0
17	6.025	15.8	13.7748	10.8	21.60

Tablas de resultados generadas mediante el Programa Desfogue para las fallas presentes en el la red de tuberías de desfogue ácido del SRP de la planta HDS de Naftas de Coquización en la Refinería de Minatitlán, Veracruz.

Tabla A.12. Diámetros generados mediante el programa Desfogue para la falla por flujo inverso 1 del cabezal de desfogue ácido de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sisistema}$
1	6.025	9.99	0	0	0
2	6.025	14.62	0	0	0
3	6.025	21.14	25.51	16.14	36.73

Tabla A.13. Diámetros generados mediante el programa Desfogue para la falla por flujo inverso 2 del cabezal de desfogue ácido de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sisistema}$
1	7.981	6.34	0	0	0
2	7.981	7.72	0	0	0
4	7.981	9.71	0	0	0
5	6.025	18.04	14.71	13.04	11.35

Tabla A.14. Diámetros generados mediante el programa Desfogue para la falla por flujo inverso 3 del cabezal de desfogue ácido de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	7.981	10.68	0	0	0
2	7.981	15.3	0	0	0
4	6.025	37.57	0	0	0
6	6.025	45.95	0	0	0
7	6.025	57.09	60.71	52.09	14.20

Tabla A.15. Diámetros generados mediante el programa Desfogue para la falla por flujo inverso 4 del cabezal de desfogue ácido de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	6.025	10.82	0	0	0
2	6.025	16.03	0	0	0
4	6.025	22.54	0	0	0
6	6.025	25.83	0	0	0
8	6.025	27.11	0	0	0
9	6.025	32.6	32.55	27.6	15.21

Tabla A.16. Diámetros generados mediante el programa Desfogue para la falla por flujo inverso 5 del cabezal de desfogue ácido de la planta HDS de Naftas de Coquización.

Tramo	Diametro(in)	Presión (psig)	ΔP_{disp} (psi)	ΔP_{sist} (psi)	% de diferencia entre la ΔP_{disp} y la $\Delta P_{sistema}$
1	6.025	9.07	0	0	0
2	4.026	35.64	0	0	0
4	3.068	101.67	0	0	0
6	2.469	160.6	0	0	0
8	2.469	178.39	0	0	0
10	2.469	234.94	0	0	0
11	2.469	274.46	0	0	0
12	2.469	301.78	304.78	296.78	2.62

ANEXO B.

A continuación se presenta el código del programa utilizado para la optimización de la red de tuberías utilizando algoritmos genéticos.

```

!*****
PROGRAMA ALGORITMOS GENETICOS
!*****

##### MODULOS PARA LA CONFIGURACIÓN #####

Module Configuracion
  Type Config
    Integer, Dimension(1:200)::Ident, Clase, Descarga, Secuenc, SecPres
  End Type Config
  Type Propiedad
    Real*8, Dimension(1:200)::W, T, ContPres, Cps, KCp, Visco, JouleT, FZ
    Real*8, Dimension(1:200)::PMol, FMol, Diam, Pres, Longit, Lequiv
  End Type Propiedad
  Integer::Numval, NumTramo
  Real*4 :: Pfijs0, Patm0, Rug, ParamR
  Type(Config)::Configural
  Type(Propiedad)::PropI
End Module Configuracion

Module Valvulas
  Real*4 :: Prelevo(1:200), Trelevo(1:200), JTomp(1:200), ContraP(1:200)
  integer:: Idenvalv(1:200)
End Module

!***** MODULOS DEL ALGORITMO GENÉTICO #####

Module gap
  Parameter(indmax=1000, nchrmax=100, nparmax=100)
  Real(kind=8):: child(nparmax, indmax)
  Real(kind=8):: parmax(nparmax), parmin(nparmax), pardel(nparmax)
  Real(kind=8):: parent(nparmax, indmax)
  Real(kind=8):: fitness(indmax)
  Real(kind=8):: g0(nparmax), g1(nparmax)
  Real(kind=8):: psolve(nparmax)
  Integer      :: npopsiz, nowrite
  Integer      :: nparam, nchrome
  Integer      :: iparent(nchrmax, indmax)
  Integer      :: iq2(nparmax)
  Integer      :: nposibl(nparmax)
  Integer      :: ichild(nchrmax, indmax)
  Integer      :: richflg(nparmax)
End Module

Module Inputga
  Real(kind=8):: pcross, pmutate, pereep
  Integer      :: icreep, idum, ielite, iend, iniche, irestrt, iskip
  Integer      :: itourny, iunifrm, kountmx, maxgen, microga, nchild
End Module

##### PROGRAMA PRINCIPAL #####

Program ProgramaGA
  Use gap
  Use inputga
  Implicit Real*8 (a-h, o-z)
  Save

```

```

Dimension ibest(nchrmax)
Dimension geni(1000000),genavg(1000000),genmax(1000000)

Call input

Perform necessary initialization and Read the ga.restart file.
Call initial(istart,npossum,ig2sum)
call inicial

Open(unit=4,file='Penalizaciones.txt')
Open(Unit=18,file='Resumen.txt')
Write (18,'(//,"Gen",2x,"Aptitud Promedio",2x,"Mejor Aptitud",2x,"Parametros")')

$$$$ Maingenerational processing loop. $$$$
kount=0
Do i=istart,maxgen+istart-1
  Write (6,1111) i
  Write (24,1111) i
  Write (4,1111) i
  !Write (18,1111) i
  Write(4,'(//,"ind",2x,"Penalidad")')

  Write(24,1050)

  Evaluar la población, asignar la adaptación,establecerel mejor
  individuo, y escribir la información de salida.
  Call evalout(i,iskip,iend,ibest,fbar,best)
  geni(i)=float(i)
  genavg(i)=fbar
  genmax(i)=best
  If(npopsiz.eq.1 .or. iskip.ne.0) Then
    close(24)
    stop
  End If

  Implementar "niching".
  If (iniche.ne.0) Call niche

  Incorporar elloop de selecció n, cruzamiento y mutación.
  ncross=0
  ipick=npopsiz
  Do j=1,npopsiz,nchild

    Desarrollo de la seleccón.
    Call selectn(ipick,j,matel,mate2)

  Ahora se desarrolla el cruzamiento entre el par seleccionado
  aleatoriamente.
    Call crossovr(ncross,j,matel,mate2)
  End Do
  Write(6,1225) ncross
  Write(24,1225) ncross

  Ahora desarrollar las mutaciones aleatorias. Si está corriendo
  micro-GA, mutacion skip .
  If (microga.eq.0) Call mutate

  Escribir el arreglo de hjos dentro del arreglo de padres para la nueva
  generación. Compruebe para ver si el mejor padre fue replicado.
  Call newgen(ielite,npossum,ig2sum,ibest)

  Poner micro-GA en ejecución si esta permitido (o activo).
  If (microga.ne.0) Call gamicro(1,npossum,ig2sum,ibest)

  Escribir al archivo de reinicio.
  Call restart(i,istart,kount)
End Do

```

ANEXO B.

```

Call Evaluacionfinal

Write(24,3000)
Do i=1,maxgen
    evals=float(npopsiz)*geni(i)
    Write(24,3100) geni(i),evals,genavg(i),genmax(i)
End Do

CLOSE (24)
Close (4)
Close (18)

1050 Format(1x,' #     Codigo Binario',30x,'Param1 Param2 Aptitud')
1111 Format(//'##### Generación',15,' #####')
1225 Format('/' Número de Cruzamiento      '=',15)
3000 Format(2x//'Resumen de Salida'//
    &2x,'Generación Evaluaciones Aptitud Prom. Mejor Aptitud')
3100 Format(2x,3(e10.4,4x),e11.5)
    stop
End Program ProgramaGA

#####

Subroutine input
!
! Esta Subrutina introduce la información del archivo ga.inp (gafort.in)
!

Use gap
Use inputga

Implicit Real*8 (a-h,o-z)
Save

kountmx=5
irestrt=0
itourny=0
ielite=0
iuniform=0
iniche=0
iskip=0
iend=0
nchild=1
Do i=1,nparam
    nichflg(i)=1
End Do
microga=0

Open (UNIT=24, FILE='ga.out', STATUS='UNKNOWN')
Rewind 24
Open (UNIT=23, FILE='ga.inp', STATUS='Unknown')
Read (23, *)irestrt,microga,npopsiz,nparam,pmutate,maxgen,idum,pcross,itourny,&
    ielite,icreep,pcreep,iuniform,iniche,nchild,iskip,iend,nowrite,&
    kountmx,parminim,parmaxim,nposibil,nichflg

Close (23)

Do i=1, nparam
    parmin(i)=parminim
    parmax(i)=parmaxim
    nposibl(i)=nposibil
    nichflg(i)=nichflg
End do

itourny=1

! Verificación para errores de tamaño de arreglo.

If (npopsiz.gt.indmax) Then

```

ANEXO B.

```

        Write(6,1600) npopsiz
        Write(24,1600) npopsiz
        close(24)
        stop
    End If

    If (nparam.gt.nparamx) Then
        Write(6,1700) nparam
        Write(24,1700) nparam
        close(24)
        stop
    End If

!
!
    Si se usa la opción microga, se borran algunas variables de entrada

    If (microga.ne.0) Then
        pmutate=0.0d0
        pcreep=0.0d0
        itourny=1
        ielite=1
        iniche=0
        nchild=1
        If (iunifrm.eq.0) Then
            pcross=1.0d0
        Else
            pcross=0.5d0
        End If
    End If

    Return
End Subroutine input

```

```

1600 Format(1x,'ERROR: npopsiz > indmax. Set indmax = ',i6)
1700 Format(1x,'ERROR: nparam > nparamx. Set nparamx = ',i6)

```

#####

```

Subroutine initial(istart,npossum,ig2sum)
!
    Use gap
    Use inputga
! This Subroutine sets up the program by generating the g0, g1 and
! ig2 arrays, and counting the number of chromosomes required for the
! specified input. The Subroutine also initializes the random number
! generator, parent and iparent arrays (reads the ga.restart file).
    Implicit Real*8 (a-h,o-z)
    Save

    Do i=1,nparam
        g0(i)=parmin(i)
        pardel(i)=parmax(i)-parmin(i)
        ql(i)=pardel(i)/dble(npossil(i)-1)
    End Do
    Do i=1,nparam
        Do j=1,30
            n2j=2**j
            If (n2j.ge.nposibl(i)) Then
                ig2(i)=j
                goto 8
            End If
            If (j.ge.30) Then
                Write(6,2000)
                Write(24,2000)
                close(24)
                stop
            End If
        End Do
    End Do

```

ANEXO B.

```

      End Do
      continue
8      End Do
!
!      Contar el número de cromosomas (bits) requeridos
!
      nchrome=0
      npossum=0
      ig2sum=0
      Do i=1,nparam
          nchrome=nchrome+ig2(i)
          npossum=npossum+nposibl(i)
          ig2sum=ig2sum+(2**ig2(i))
      End Do
      If (nchrome.gt.nchrmax) Then
          Write(6,1800) nchrome
          Write(24,1800) nchrome
          close(24)
          stop
      End If
!
      If (npossum.lt.ig2sum .and. microga.ne.0) Then
          Write(6,2100)
          Write(24,2100)
      End If
!
!      Inicialización del generador de numero aleatorios
!
      Call ran3(idum,rand)
!
      If(irestart.eq.0) Then
!      Inicializar la distribución de parametros en los individuos padres
!      cuando irestrt=0.
          istart=1
          Do i=1,npopsiz
              Do j=1,nchrome
                  Call ran3(1,rand)
                  iparent(j,i)=1
                  If(rand.lt.0.5d0) iparent(j,i)=0
              End Do
              If (npossum.lt.ig2sum) Call possibl(parent,iparent)
          End Do
          Else
!      Si irestrt.ne.0, leer del archivo restart.
          OPEN (UNIT=25, FILE='ga.restart', STATUS='OLD')
          Rewind 25
          Read(25,*) istart,npopsiz
          Do j=1,npopsiz
              Read(25,*) k,(iparent(1,j),l=1,nchrome)
          End Do
          CLOSE (25)
      End If
!
      If(irestart.ne.0) Call ran3(idum-istart,rand)
!
1800 Format(1x,'ERROR: nchrome > nchrmax. Fijar nchrmax = ',i6)
2000 Format(1x,'ERROR: Tienes un parametro con un numero de ' /&
& 1x,' posibilidades > 2**30! Si realmente deseas este, ' /&
& 1x,' cambio el Do loop 7 statement and recompile. ' /&
& 1x,' Tambien puedes necesitar alterar el codigo para trabajar con ' /&
& 1x,' numeros Reales en lugar que numeros ENTEROS; Fortran ' /&
& 1x,' no tiene gusto por calcular 2**j cuando j>30. ')
2100 Format(1x,'ADVERTENCIA: para algunos casos, se ha observado una reduccion ' /&
& 1x,' considerable en el fucionamiento cuando corremos ' /&
& 1x,' un numero no optimo de bits con el micro-GA. ' /&
& 1x,' Si es posible, use valores para nposibl de 2**n, ' /&

```


ANEXO B.

```

&      lx,' e.g. 2, 4, 8, 16, 32, 64, etc. Ver archivo README .'
!
      Return
End Subroutine Initial

#####

Subroutine Evalout(i,iskip,iend,ibest,fbar,best)
!
      Use gap
!
      Esta subrutina evalua la poblacion, asigna aptitud, establece
!      el mejor individuo, y la informacion de salida.

      Implicit Real*8 (a-h,o-z)
      Save
      Dimension paramsm(nparam),paramav(nparam),ibest(nchrmax)

      fitsum=0.0d0
      best=-1.0d10
      Do n=1,nparam
      paramsm(n)=0.0d0
          psolve(n)=0.0d0      !VARIABLE INTRODUCIDA EN CODIGO ORIGINAL
      End Do
      jstart=1
      jend=npopsiz
      If(iskip.ne.0) jstart=iskip
      If(iend.ne.0) jend=iend
      Do j=jstart,jend
          Call decode(j,parent,iparent)
          If(iskip.ne.0 .and. iend.ne.0 .and. iskip.eq.iend)&
              Write(6,1075) j,(iparent(k,j),k=1,nchrmax),&
                  (parent(kk,j),kk=1,nparam),0.0
!
!      Llamar al evaluador de la funcion, escribir el individuo y su aptitud, y agreagar
!      a la suma para el promedio posterior.
!
          Call NormalParam(j)
          Call func(j,funcval,Penalidad)
          Write(4,'(2x,i3,4x,f15.6)')j,Penalidad
          fitness(j)=funcval
          Write(24,1075) j,(iparent(k,j),k=1,nchrmax),&
              (parent(kk,j),kk=1,nparam),fitness(j)
          fitsum=fitsum+fitness(j)
          Do n=1,nparam
              paramsm(n)=paramsm(n)+parent(n,j)
          End Do
!
!      Verificar para ver si la aptitud del individuo j es la mejor aptitud.

          If (fitness(j).gt.best) Then
              best=fitness(j)
              jbest=j
              Do k=1,nchrmax
                  ibest(k)=iparent(k,j)
              End Do
              Do n=1,nparam
                  psolve(n)=parent(n,j)      !Este codigo Tambien es nuevo
              End Do
          End If
      End Do

!      Calcular parametros y Aptitudes(Adaptación) Promedios.

      fbar=fitsum/dble(npopsiz)
      Do n=1,nparam
          paramav(n)=paramsm(n)/dble(npopsiz)
      End Do

```

ANEXO B.

```

1      Escribir información de Salida.

      Write(18, '(1x,i3,6x,f15.8,6x,f15.8,6x,20(f10.7,1x))',i,fbar,&
      best,(psolve(n),n=1,nparam) !Escritura nueva

      If (npopsiz.eq.1) Then
          Write(24,1075) 1,(iparent(k,1),k=1,nchrome),&
          (parent(k,1),k=1,nparam),fitness(1)
          Write(24,*) ' Average Values:'
          Write(24,1275) (parent(k,1),k=1,nparam),fbar
      Else
          Write(24,1275) (paramav(k),k=1,nparam),fbar
      End If
      Write(6,1100) fbar
      Write(24,1100) fbar
      Write(6,1200) best
      Write(24,1200) best

1075  Format(i3,2x,30l1,2(1x,f9.7),1x,f10.7)
1100  Format(1x,'Valor Promedio de la Funcion de Generacion =',f10.7)
1200  Format(1x,'Valor Maximo de la Funcion          =',f10.7/)
1275  Format(/' Valores Promedio :',16x,2(1x,f9.6),1x,f10.7/)
      Return
      End Subroutine Evalout

#####

      Subroutine niche

! Implement "niching" through Goldberg's multidimensional phenotypic
! sharing scheme with a triangular sharing function. To find the
! multidimensional distance from the best individual, normalize all
! parameter differences.

      Use gap
      Implicit Real*8 (a-h,o-z)
      Save

      sigshar=0.1d0
      nniche=0
      Do jj=1,nparam
          nniche=nniche+nichflg(jj)
      End Do
      If (nniche.eq.0) Then
          Write(6,1900)
          Write(24,1900)
          close(24)
          stop
      End If
      Do ii=1,npopsiz
          sumshar=0.0d0
          Do j=1,npopsiz
              del2=0.0d0
              Do k=1,nparam
                  If (nichflg(k).ne.0) Then
                      del2=del2+((parent(k,j)-parent(k,ii))/pardel(k))**2
                  End If
              End Do
              del=(dsqrt(del2))/dble(nniche)
              If (del.lt.sigshar) Then
                  share=1.0-((del/sigshar)**alpha)
                  share=1.0d0-(del/sigshar)
              Else
                  share=0.0d0
              End If
          End Do
      End Do
  
```

ANEXO B.

```

                sumshar=sumshar+share/dble(npopsiz)
            End Do
            If (sumshar.ne.0.0d0) fitness(ii)=fitness(ii)/sumshar
        End Do

1900 Format(1x,'ERROR: niche=1 and all values in nichflg array = 0'/4
        &1x,'          Do you want to niche or not?')
!
        Return
    End Subroutine niche

#####

    Subroutine selectn(ipick,j,mate1,mate2)
!
! Subrutina para el operador de selección. Actualmente, selección por
! torneos es la única opción disponible.

        Use gap
        Use inputga
        Implicit Real*8 (a-h,o-z)
        Save

! Si la selección por torneos es elegida (i.e. itourny=1), entonces
! ejecutar la selección "tournament" para la selección de la nueva población.
        If(itourny.eq.1) Then
            Call select(mate1,ipick)
            Call select(mate2,ipick)
!
            Write(3,*) mate1,mate2,fitness(mate1),fitness(mate2)
            Do n=1,nchrome
                ichild(n,j)=iparent(n,mate1)
                If(nchild.eq.2) ichild(n,j+1)=iparent(n,mate2)
            End Do
        End If

        Return
    End Subroutine selectn

#####

    Subroutine crossovr(ncross,j,mate1,mate2)

        Use gap
        Use inputga
!
! Subrutina para cruzamiento entre el par seleccionado aleatoriamente
        Implicit Real*8 (a-h,o-z)
        Save

        If (iunifrm.eq.0) Then
!
! Cruzamiento de un punto en un punto aleatorio del cromosoma.
            Call ran3(1,rand)
            If(rand.gt.pcross) goto 65
            ncross=ncross+1
            Call ran3(1,rand)
            icross=2+aint(dble(nchrome-1)*rand)
            Do n=icross,nchrome
                ichild(n,j)=iparent(n,mate2)
                If(nchild.eq.2) ichild(n,j+1)=iparent(n,mate1)
            End Do
        Else
!
! Realizar cruzamiento uniforme entre el par seleccionado aleatoriamente.
            Do n=1,nchrome
                Call ran3(1,rand)
                If(rand.le.pcross) Then
                    ncross=ncross+1
                    ichild(n,j)=iparent(n,mate2)
                    If(nchild.eq.2) ichild(n,j+1)=iparent(n,mate1)
                End If
            End Do
        End If
    End Subroutine crossovr

```

```

                                End If
                            End Do
                        End If
                    End If
                End If
            End If
        End If
    End Do
End Subroutine crossover

69      continue

        Return
    End Subroutine crossover

#####

Subroutine mutate

    Use gap
    Use inputga
    Implicit Real*8 (a-h,o-z)
    Save

! Esta Subrutina realiza mutaciones en la generacion de los hijos.
! Realiza mutación de salto aleatorio, si un número aleatorio es menor que pmutate.
! Realiza mutación de arrastre aleatorio, si un número aleatorio diferente es menor
! que pcreep.

    nmutate=0
    ncreep=0
    Do j=1,npopsiz
        Do k=1,nchrome
!
            Jump mutation
                Call ran3(1,rand)
                If (rand.le.pmutate) Then
                    nmutate=nmutate+1
                    If(ichild(k,j).eq.0) Then
                        ichild(k,j)=1
                    Else
                        ichild(k,j)=0
                    End If
                    If (nowrite.eq.0) Write(6,1300) j,k
                    If (nowrite.eq.0) Write(24,1300) j,k
                End If
            End Do
!
            Mutación de arrastre (una posición discreta ausente).
            If (icreep.ne.0) Then
                Do k=1,nparam
                    Call ran3(1,rand)
                    If(rand.le.pcreep) Then
                        Call decode(j,child,ichild)
                        ncreep=ncreep+1
                        creep=1.0d0
                        Call ran3(1,rand)
                        If (rand.lt.0.5d0) creep=-1.0d0
                        child(k,j)=child(k,j)+gl(k)*creep
                        If (child(k,j).gt.parmax(k)) Then
                            child(k,j)=parmax(k)-1.0d0*gl(k)
                        elseif (child(k,j).lt.parmin(k)) Then
                            child(k,j)=parmin(k)+1.0d0*gl(k)
                        End If
                        Call code(j,k,child,ichild)
                        If (nowrite.eq.0) Write(6,1350) j,k
                        If (nowrite.eq.0) Write(24,1350) j,k
                    End If
                End Do
            End If
        End Do
    End Do
    Write(6,1250) nmutate,ncreep
    Write(24,1250) nmutate,ncreep

1250  Format(/'  Number of Jump Mutations  =',15/&
        &      '  Number of Creep Mutations =',15)

```

ANEXO B.

```

1300 Format('+++ Jump mutation performed on individual ',i4,4
&      ', chromosome ',i3,' +++')
1350 Format('+++ Creep mutation performed on individual ',i4,6
&      ', parameter ',i3,' +++')

      Return
End Subroutine mutate

!#####

Subroutine newgen(ielite,npossum,ig2sum,ibest)

! Write child array back into parent array for new generation. Check
! to see If the best parent was replicated; If not, and If ielite=1,
! Then reproduce the best parent into a random slot.

      Use gap
      Implicit Real*8 (a-h,o-z)
      Save
      Dimension ibest(nchrmax)

      If (npossum.lt.ig2sum) Call possibl(child,ichild)
      kelite=0
      Do j=1,npopsiz
        jelite=0
        Do n=1,nchrone
          iparent(n,j)=ichild(n,j)
          If (iparent(n,j).eq.ibest(n)) jelite=jelite+1
          If (jelite.eq.nchrone) kelite=1
        End Do
      End Do
      If (ielite.ne.0 .and. kelite.eq.0) Then
        Call ran3(1,rand)
        irand=1d0+dint(dble(npopsiz)*rand)
        Do n=1,nchrone
          iparent(n,irand)=ibest(n)
        End Do
        Write(24,1260) irand
      End If

1260 Format(' Reproducción Elitista en Individuo ',i4)

      Return
End Subroutine newgen

!#####

Subroutine gamicro(i,npossum,ig2sum,ibest)

! Implementación de la Subrutina Micro-GA

      Use gap
      Implicit Real*8 (a-h,o-z)
      Save
      Dimension ibest(nchrmax)

! Primero, verificar para la convergencia de la micro población.
! Si convergió. enpezar una nueva generación con el mejor individuo
! y llenar él resto de la población con los nuevos padres
! aleatoriamente generados.

! Cuente el número de diversos bits del mejor miembro en la micro-población
icount=0
      Do j=1,npopsiz
        Do n=1,nchrone
          If(iparent(n,j).ne.ibest(n)) icount=icount+1
        End Do
      End Do

```

```

      End Do
!
!   If icount less than 5% of number of bits, Then consider population
!   to be converged. Restart with best individual and random others.
!   Si icount es menor que el 5% de número de bits, entonces considerar
!   a la población ser convergido. Recomenzar con los mejores individuos
!   y otros al azar.
!
      diffrac=dble(icount)/dble((npopsiz-1)*nchrome)
      If (diffrac.lt.0.05d0) Then
        Do n=1,nchrome
          iparent(n,1)=ibest(n)
        End Do
        Do j=2,npopsiz
          Do n=1,nchrome
            Call ran3(1,rand)
            iparent(n,j)=1
            If(rand.lt.0.5d0) iparent(n,j)=0
          End Do
        End Do
        If (npossum.lt.ig2sum) Call possibl(parent,iparent)
        Write(6,1375) i
        Write(24,1375) i
      End If
1375 Format(//'##### Restart micro-population at generation',&
&         i5,' #####')
      Return
End Subroutine gamicro

#####

Subroutine select(mate,ipick)
!
!   Esta rutina selecciona la mejor de dos posibles padres poracoplamiento
Use gap
  Implicit Real*8 (a-h,o-z)
  Save

  If(ipick+1.gt.npopsiz) Call shuffle(ipick)
  ifirst=ipick
  isecond=ipick+1
  ipick=ipick+2
  If(fitness(ifirst).gt.fitness(isecond)) Then
    mate=ifirst
  Else
    mate=isecond
  End If
!
  Write(3,+) 'select',ifirst,isecond,fitness(ifirst),fitness(isecond)

  Return
End Subroutine select

#####

Subroutine shuffle(ipick)
!
!   Esta rutina mezcla el arreglo del padre y su aptitud correspondiente

  Use gap
  Implicit Real*8 (a-h,o-z)
  Save

  ipick=1
  Do j=1,npopsiz-1

```

```

        Call ran3(1,rand)
        iother=j+1+dint(dble(npopsiz-j)*rand)
        Do n=1,nchrome
            itemp=iparent(n,iother)
            iparent(n,iother)=iparent(n,j)
            iparent(n,j)=itemp
        End Do
        temp=fitness(iother)
        fitness(iother)=fitness(j)
        fitness(j)=temp
    End Do

    Return
End Subroutine shuffle

! =====

Subroutine decode(i,array,iarray)

! Esta rutina decodifica una codena binaria a un número real.

    Use gap
    Implicit Real*8 (a-h,o-z)
    Save

    Dimension array(nparam,indmax),iarray(nchrmax,indmax)

    l=1
    Do k=1,nparam
        iparam=0
        m=1
        Do j=m,m+ig2(k)-1
            l=l+1
            iparam=iparam+iarray(j,i)*(2**+(m+ig2(k)-1-j))
        End Do
        array(k,i)=g0(k)+g1(k)*dble(iparam)
    End Do

    Return
End Subroutine decode

! =====

Subroutine code(j,k,array,iarray)

! Esta Subrutina codifica un parametro dentro de una cadena binaria.

    Use gap
    Implicit Real*8 (a-h,o-z)
    Save

    Dimension array(nparam,indmax),iarray(nchrmax,indmax)

! Primero. establecer la localzacion inicial de la cadena del
! parametro de interes

        istart=i
        Do l=1,k-1
            istart=istart+ig2(l)
        End Do

! Encontrar el codigo equivalente al valor del parametro, regresa
! la cadena binaria por factores de dos.

        m=ig2(k)-1
        If (g1(k).eq.0.0d0) Return

```

ANEXO B.

```

        iparam=nint((array(k,j)-g0(k))/gl(k))
        Do i=istart,istart+ig2(k)-1
            iarray(i,j)=0
            If ((iparam+1).gt.(2**m)) Then
                iarray(i,j)=1
                iparam=iparam-2**m
            End If
            m=m-1
        End Do
        Write(3,*)array(k,j),iparam,(iarray(i,j),i=istart,istart+ig2(k)-1)
!
!
        Return
        End Subroutine code

! #####
!
Subroutine possibl(array,iarray)
!
!     Esta Subrutina determina
!     En este subprograma se determina si o no todos los parámetros están dentro
!     de la gama especificada de la posibilidad. Si no, el parámetro se reasigna
!     aleatoriamente dentro de la gama. Este subprograma es solamente necesario
!     cuando el número de posibilidades por parámetro no se optimiza para ser
!     2**n, i.e. Si npossum < ig2sum.
!
!
Use gap
Implicit Real*8 (a-h,o-z)
Save

!
Dimension array(npamax,indmax),iarray(nchrmax,indmax)

        Do i=1,npopsiz
            Call decode(i,array,iarray)
            Do j=1,nparam
                n2ig2j=2**ig2(j)
                If(nposibl(j).ne.n2ig2j .and. array(j,1).gt.pamax(j)) Then
                    Call ran3(1,rand)
                    irand=dint(dble(nposibl(j))*rand)
                    array(j,1)=g0(j)+dble(irand)*gl(j)
                    Call code(i,j,array,iarray)
                    If (nowrite.eq.0) Write(6,1000) i,j
                    If (nowrite.eq.0) Write(24,1000) i,j
                End If
            End Do
        End Do

!
1000 Format('*** Parameter adjustment to individual      ',i4,&
&         ', parameter ',i3,' ***')
!
        Return
        End Subroutine possibl

! #####
!
Subroutine restart(i,istart,kount)
!
!     Esta Subrutina escribe la información de reinicio al archivo ga.restart.
!
!
        Use gap
        Use inputga
        Implicit Real*8 (a-h,o-z)
        Save

!
        kount=kount+1
        If(i.eq.maxgen+istart-1 .or. kount.eq.kountmx) Then
            OPEN (UNIT=25, FILE='ga.restart', STATUS='OLD')
            rewind 25

```


ANEXO B.

```

        Write(25,*) i+1,npopsiz
        Do j=1,npopsiz
            Write(25,1500) j,(iparent(1,j),i=1,nchrome)
        End Do
        CLOSE (25)
        kount=0
    End If

1500   Format(15,5x,30i2)

        Return
    End Subroutine restart

#####

Subroutine ran3(idum,rand)
!
!   Retorna una desviación aleatoria uniforme entre 0.0 y 1.0. Establecer
!   idum a algún valor negativo para inicializar o reinicializar la secuencia.
!   Esta función fue tomada de W.H. Press', "Numerical Recipes" p. 199.
!
!
!   Implicit Real*8 (a-h,m,o-z)
!   Save
!   Implicit Real*4(m)
!   parameter (mbig=4000000.,mseed=1618033.,mz=0.,fac=1./mbig)
!   parameter (mbig=1000000000,mseed=161803398,mz=0.,fac=1./mbig)
!
!   De acuerdo a Knuth, algun valor grande de mbig, y algun valor muy pequeño
!   (pero un valor grande de still) de mseed puede ser sustituido por los
!   valores de arriba
!
!
!   Dimension ma(55)
!   data iff /0/
!   If (idum.lt.0 .or. iff.eq.0) Then
!       iff=1
!       mj=mseed-dble(iabs(idum))
!       mj=dmod(mj,mbig)
!       ma(55)=mj
!       mk=1
!       Do i=1,54
!           ii=mod(21*i,55)
!           ma(ii)=mk
!           mk=mj-mk
!           If(mk.lt.mz) mk=mk+mbig
!           mj=ms(ii)
!       End Do
!       Do k=1,4
!           Do i=1,55
!               ma(i)=ma(i)-ma(1+mod(i+30,55))
!               If(ma(i).lt.mz) ma(i)=ma(i)+mbig
!           End Do
!       End Do
!       inext=0
!       inextp=31
!       idum=1
!   End If
!   inext=inext+1
!   If(inext.eq.56) inext=1
!   inextp=inextp+1
!   If(inextp.eq.56) inextp=1
!   mj=ma(inext)-ma(inextp)
!   If(mj.lt.mz) mj=mj+mbig
!   ma(inext)=mj
!   rand=mj*fac
!   Return
End Subroutine ran3

```

ANEXO B.

```
#####
```

```
Subroutine func(j,funcval,Penalidad)
```

```
! Esta función evalúa la aptitud del individuo, llamando a la función
! de aptitud
```

```
Use gap
Implicit none
Save
```

```
Real*8 funcval,X(1:nparam),Aptitud1,Penalidad
integer i,j
```

```
funcval=1.0d0
```

```
! Variables adicionales
```

```
Do i=1,nparam
    if (parent(i,j).le.0.0) parent(i,j)= 0.5
    X(i)=parent(i,j)
End Do
```

```
call Aptitud(X,Aptitud1,Penalidad)
funcval=Aptitud1
Return
```

```
End Subroutine func
```

```
#####
```

```
Subroutine Inicial
```

```
! Aquí se realiza la lectura los datos de la configuración de la red
! de tuberías a sí como las propiedades de valvulas.
```

```
Use Configuracion
Implicit none
```

```
! Variables
```

```
integer::I
character(len=20)::Datosin
```

```
Pfija0=5.0
Patm0=14.7
Rug=0.0001
```

```
Write(*,*)'Nombre del Archivo de Datos'
```

```
Read(*,*) Datosin
```

```
Open(unit=2,File=Datosin) ! Archivo de datos que contiene la
! información de la red.
```

```
Read(2,*) numramo,numval
Read(2,*)(Configural%ident(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Configural%Descarga(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Configural%Clase(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Configural%Secuenc(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Configural%SecPres(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%w(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%Fmol(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%PMol(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%Cps(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%KCP(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%FZ(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%Visco(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%T(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%Longit(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%Lequiv(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%Pres(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%ContPres(i),i=1,numramo,1)
Read(2,*)(Prop1%JouleT(i),i=1,numramo,1)
```

ANEXO B.

```

        Read(2,*) ParamR
        Call ConfigValv
    End Subroutine Inicial

!#####

Subroutine Aptitud(X,Aptitud!,Penal)

! Subrutina que evalua la aptitud mediante la función objetivo
! definida.

    Use Configuración

    Real(kind=8)::Aptitud!,Alfa , Beta , Gama , Suma(1:200),SumaT,Penal
    Real(kind=8):: X(1:NumTramo),r !,Pfija,Patm,e
    Suma = 0
    Alfa = 156.01
    Beta = 43.448
    Gama = 14.22
    r=ParamR
    Do j = 1, Numtramo
        Prop1%Diam(j)=X{j}
        Suma(j) = Prop1%Longit(j)*(Alfa* X{j}**2 + Beta * X{j} + Gama)
    End do
    SumaT=Sum(Suma)
    Penal = PENALIDAD()
    Aptitud! = 1 / (Penal)

End Subroutine Aptitud

!#####

Real Function PENALIDAD()

! Evalua la penalidad ocasionada por las violaciones de Caída de
! presión en las trayectorias válvula-quemador.

    Use Configuración
    Use Valvulas
    Real(kind=8)::DP(1:Numval), SumPenal(1:Numval), DPperm(1:Numval), dif, PenalI(Numval)
    !,X(1:NumTramo)
    ntram = NumTramo
    ii = 1
    jj = 1
    Do i= 1, Numval
        DPperm[i] = ContraP(i)**2 - Pfija0**2
    End do
! Do i = 1, ntram
!     X[i] = Prop1%Diam[i]
! end do
    Call Presiones(ntram)

! Do while (ii.le.100)
!     Call Temperaturas(ntram)
!     Call Presiones(ntram)
!     ii=ii+1
! End Do

    Do i = 1, Numval
        h = Idenvalv(i)
        DP(i) = Prop1%Pres(h)**2 - Pfija0**2
        SumPenal(i) = (DPperm(i)-DP(i))
        PenalI(i)=abs(SumPenal(i))
    End do
    PENALIDAD = maxval(PenalI,Numval)

End Function

```

ANEXO B.

```

#####

Subroutine ConfigValv()
!   Reasigna el valor de las propiedades a vectores de menor tamaño

Use Configuracion
Use Valvulas
j = 1
Do i = 1, numtramo
    If (Configural%Clase(i) .eq. 2) Then
        Idenvalv(j) = Configural%Ident(i)
        Prelevo(j) = Prop1%Pres(i)
        Trelevo(j) = Prop1%T(i)
        ContraP(j) = Prop1%ContPres(i)
        JTomp(j) = Prop1%JouleT(i)
        j = j + 1
    End If
End Do

End Subroutine ConfigValv

#####

Subroutine Temperaturas(Ntram)
!   ESTA SUBROUTINA CALCULA TEMPERATURA EN CADA TRAMO DE TUBERÍA

Use Configuracion
Use Valvulas
Integer, Intent(in)::Ntram
Real(kind=8):: TI, TT, Decremento
Integer:: i,j, KK
!   Calculo de la Temperatura despues de la Expasión en las Válvulas
!   la expansion existente se considera isoentalpica
!   Call Configvalv
j = 1
Do i=1, ntram
    K=Configural%Clase(i)
    if (k.eq.2) then
        decremento=JTomp(j)*{Prelevo(j)-Prop1%ContPres(i)}
        Prop1%T(i)=Trelevo(j)-decremento
        j=j+1
    End If
End do
j = 1
TI = 0.0
Do i = 1, Ntram
    kk = Configural%Secuenc(i)
    TT = 0.0
    Do j = 1, Ntram
        If (kk .eq. Configural%Descarga(j)) Then
            TI = Prop1%Cps(j)*Prop1%W(j)*(Prop1%T(j)+460)
            TT = TT + TI
        End If
    End do
    If (TT .eq. 0.0) Then
        Prop1%T(kk) = Prop1%T(kk)
    Else
        Prop1%T(kk) = TT/{Prop1%W(kk)*Prop1%Cps(kk)}-460
    End If
End Do
End Subroutine Temperaturas

#####

Subroutine Presiones(Ntram)

```

ANEXO B.

```

! Esta Subrutina calcula Presión en cada nodo de la red de tubería
! Utilizando la ecuación de Conison.
  Use Configuración
  Integer, Intent(in)::Ntram
  Real*8::ED(1:Ntram)
  Real*8::Patm1, FF, LT, TT, WW, PMM, Conste, Cte, V1, V2, Pact, Pnew, diferencia, Termino, Terminol
  External Nre
  Integer::i, h, kk
  Real(kind=8), Allocatable, Dimension(:) :: Reynolds, FactFric, ConsK
  Allocate( ConsK(1:ntram), Reynolds(1:ntram), FactFric(1:ntram))
  Patm1 = Patm0 * 144

  Do i=1, ntram
    ED(i)=10**(-log10(Prop1%Diam(i)*12)-2.7447)
  End do

! Evaluación del Número de Reynolds en cada tramo de tubería, así como
! el factor de fricción y la longitud total.
  Do i = 1, Ntram
    LT = Prop1%Longit(i)+(Prop1%Lequiv(i)*Prop1%Diam(i))
    Reynolds(i) = NRe(Prop1%W(i), Prop1%Diam(i), Prop1%Visco(i))
    FactFric(i) = FactorF(Reynolds(i), ED(i)); FF = FactFric(i)
    PMM= Prop1%PMol(i); TT = Prop1%T(i)+460;
    WW=Prop1%W(i)**2
    Conste=1.200377E-5
    ConsK(i)= Conste * FF * LT * TT * WW / PMM
  End Do

! Evaluación de la Presión en el primer nodo (entrada del tramo final de la red).
  kk = Configuración%SecPres(1)
  Cte=Pfija0/(Pfija0+Patm0)
  Prop1%Pres(kk) = ((ConsK(kk) * Cte / ((Prop1%Diam(kk))**5) + (Pfija0 * 144)**2)**0.5)
  Pact=prop1%Pres(kk)
  diferencia=1.0
  do while (diferencia.ge.0.001)

    V1=(1967.155*Prop1%W(kk)* (Prop1%T(kk)+460)/((Pact+2116.8)*Prop1%Diam(kk)**2))/3600

    V2=(1967.155*Prop1%W(kk)* (Prop1%T(kk)+460)/((Pfija0*144+2116.8)*Prop1%Diam(kk)**2))/3600
    Termino=((4.02018e-
5)*Prop1%PMol(kk)*Pfija0*144*(Pfija0*144+Patm1)*V2**2)/(Prop1%T(kk)+460))
    Termino2=Termino*log(V2/V1)
    pnew=((ConsK(kk) * Cte / ((Prop1%Diam(kk))**5) + (Pfija0 * 144)**2
+Termino)**0.5)

    diferencia=abs (pnew-pact)
    pact=pnew
  end do
  Prop1%Pres(kk) =Pnew

! Evaluación de la presión para los nodos restantes en la red.
  Do i = 2, Ntram
    kk = Configuración%SecPres(i)
    h = Configuración%Descarga(i)
    Cte=Prop1%Pres(h)/[Prop1%Pres(h) + Patm1]
    Prop1%Pres(kk) = (ConsK(kk)*Cte/((Prop1%Diam(kk))**5) + Prop1%Pres(h)**2)**0.5
  End Do

  Do i=2, Ntram
    kk = Configuración%SecPres(i)
    h = Configuración%Descarga(i)
    Fact=Prop1%Pres(kk)
    Diferencia=1.0
    Do while (diferencia.ge.0.001)
      V1=1967.155*Prop1%W(kk)*Prop1%T(kk)/((Pact+2116.8)*Prop1%Diam(kk)**2)

      V2=1967.155*Prop1%W(kk)*Prop1%T(kk)/((Prop1%Pres(h)+Patm1)*Prop1%Diam(kk)**2)
      pnew=((ConsK(kk) * Cte / ((Prop1%Diam(kk))**5) + (Prop1%Pres(h))**2
+((4.02018e-5)*Prop1%PMol(kk)*Fact*(Fact+Patm1)*V2**2)/(Prop1%T(kk)+460)*log(V2/V1))**0.5(
      diferencia=abs (pnew-pact)
    End while
  End Do

```

ANEXO B.

```

                pact=pnew
            End do
            Propl%Pres(kk) =pnew
        End do

        Do i = 1, Ntram, 1
            Propl%Pres(i) = Propl%Pres(i) / 144
        End Do
    End Subroutine Presiones

```

#####

```
Real Function FactorF (Re, ED)
```

```

!   Evalua el factor de fricción mediante la ecuación de Colebrook
!   Real(kind=8), Intent(in)::Re,ED
!   Real(kind=8), Intent(out)::FF
!   Real(kind=8):: Alfa, Beta, Funcion, Derivada
!   Real(kind=8):: Raiz, dF, Tol
!   If (Re < 4000) Then
!       FactorF = 64 / Re
!   Else
!       Alfa = ED / 3.7
!       Beta = 2.51 / Re
!       Raiz = 1500
!       Tol = 1
!       Do While (Tol > 0.000001)
!           Funcion = Raiz + 2 * Log10(Alfa + Beta * Raiz)
!           Derivada = 1 + (2 * Beta * 0.434294482) / (Alfa + Beta * Raiz)
!           dF = Funcion / Derivada
!           Raiz = Raiz - dF
!           Tol = Abs(dF)
!       End Do
!       FactorF = Raiz**2
!   End If
End Function FactorF

```

#####

```

Real Function NRe(W, d, Visc)
!   Evaluación del número de Reynolds
!   Real(kind=8), Intent(in)::W,d,Visc
!   NRe = 6.31 * W / (d * Visc)
End Function NRe

```

#####

```

Subroutine Ordenar(a, n)
!   Esta Subrutina permite ordenar los valores de un arreglo de menor
!   a mayor.
    Use Configuracion
    Real(kind=4), Dimension(1:Numtramo):: a
    Integer, Intent(in):: n
    Real::v
    Integer::i,j
    Do i = 2, n
        v = a(i)
        j = i
        Do While (a(j - 1) .gt. v .and. j .gt. 1)
            a(j) = a(j - 1)
            j = j - 1
            If (j.eq.1) Exit ! Go to 20
        End Do
        a(j) = v
    End Do
End Subroutine Ordenar

```

ANEXO B.

```

#####
Subroutine EvaluacionFinal
! Esta subrutina permite presentar los resultados de la optimización
! escribiendo los resultados en el archivo Resultados.txt.
Use gap
Use configuracion
Real*8 Diam(nparam),DComerFt(14),DComerIn(14),DPsis(nparam)
Real*8 DPdisp(nparam)
Integer i,j,h

DComerIn=(/2.067,2.467,3.068,4.026,5.043,6.025,7.981,10.0197 &
,11.9409,13.122,15.0,16.8780,18.8110,22.6220/)
DComerFt=(/0.172244,0.205558,0.295604,0.33563,0.420604,0.505558 &
,0.665026,0.834973,0.995079,1.093504,1.25,1.406496,1.567585,1.886667/)

Do i=1, nparam
if (psolve(i).le. DComerFt(1) ) Diam(i)=DComerIn(1)
Do j=2,14
if (psolve(i).le. DComerFt(j).and.psolve(i).gt.DComerFt(j-1)) then
Diam(i)=DComerIn(j)
Propl%Diam(i)=DComerFt(j)
End if
end do
End do

cost=0.0

Do i=1, nparam
cost=cost+Propl%Longit(i)*(1.0834*Diam(i)**2+3.6206*Diam(i)+14.122)
End do

Call Presiones(nparam)

Do i=1,nparam
DPsis(i)=Propl%Pres(i)-Pfijs0
DPdisp(i)=Propl%ContPres(i)-Pfijs0
if (DPdisp(i).lt.0.0) DPsis(i)=0.0
if (DPdisp(i).le.0.0) DPdisp(i)=0.0
End Do

Call Temperaturas (nparam)

Open(unit=8, file="Resultados.txt")

Write(8,(' RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE TUBERIA ",/, &
&" DEL SRP DE BAJA PRESION DE LA HDS DE MINATITLAN ",/))
Write(8,('2x,"Tramo",2x,"Diametro(ln)",2x,"Presión psig",2x,"DP disp",2x &
&,"DP sist")')
Do i=1, nparam
Write(8,('4x,i2,4x,f6.3,4x,f10.4,3x,f10.4,3x,f10.4,3x,f10.4')i,Diam(i), &
&Propl%Pres(i),DPdisp(i),DPsis(i),Propl%T(i)
End Do
Write(8,('/',,"Costo Total de la Red = ",f15.2)')cost
close(8)
End Subroutine
#####

```