



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE GASODUCTOS Y REDES DE DISTRIBUCIÓN DE GAS

GERMÁN JOAQUÍN LÓPEZ FORERO

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Área Curricular de Ingeniería Química y Ambiental
Bogotá D.C., Colombia
2014

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE GASODUCTOS Y REDES DE DISTRIBUCIÓN DE GAS

GERMÁN JOAQUÍN LÓPEZ FORERO

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Química

Director:

Paulo César Narváez Rincón

Línea de Investigación:

Simulación

Grupo de Investigación:

Grupo de Procesos Químicos y Bioquímicos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Área Curricular de Ingeniería Química y Ambiental

Bogotá D.C., Colombia

2014

Este logro se lo agradezco a Dios y se lo dedico a mi familia y a todas las personas con las que he compartido algún instante de mi vida, pues gracias a sus consejos y buenos deseos, he logrado llegar a ser la persona que soy el día de hoy y a cosechar el fruto de mis esfuerzos.

“No existe en el universo entero persona más feliz que aquella que logra hacer realidad sus sueños con esfuerzo, paciencia y dedicación”

Germán Joaquín López Forero

Agradecimientos

Agradezco al Profesor Paulo César Narváez, Docente de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, por su apoyo en la realización de esta investigación. Al Ingeniero Oscar Fernando Carvajal quien me apoyó en la realización de la herramienta y también a la empresa TIPIEL S.A. por la oportunidad de crecer profesionalmente laborando en tan prestigiosa compañía y así tener una mejor visión en el desarrollo de este estudio.

Por último quiero agradecer a mis padres Germán López Chaves y Lilia Forero Cárdenas por sus consejos y palabras de aliento para seguir adelante con mis estudios de posgrado y hoy día optar al título de Magister en Ingeniería Química.

Resumen

El presente estudio muestra el desarrollo de un modelo de balance de nodos solucionado por teoría lineal que permite la simulación de redes de transporte y distribución de gas en estado estacionario considerando régimen isotérmico, este modelo incluye el cálculo de propiedades del gas, pérdidas de presión en accesorios por el método de las tres K, pérdidas de cabeza por válvulas de seguridad y válvulas de control y la curva característica de un equipo de compresión cuando es requerido. Adicionalmente, un modelo de optimización es implementado, el cual utiliza un algoritmo de tipo evolutivo que permite hallar la combinación de diámetros de tubería, válvulas y compresores (en caso que estén presentes en la red) que minimiza el valor de una función objetivo de costo anualizado que tiene en cuenta costos de capital y costos operativos de la red. Posteriormente, los dos modelos implementados se utilizan para desarrollar una herramienta computacional que permite tanto el modelado de redes de gas como la minimización de los costos asociados a la construcción y operación de estas. Finalmente, se resuelven ejemplos de redes estudiadas en la literatura y diseñadas a nivel industrial obteniéndose resultados satisfactorios al aplicar los modelos desarrollados.

Palabras clave: Red de gas, balance de nodos, teoría lineal, simulación, optimización, algoritmo evolutivo.

Abstract

This research shows the development of a nodal balance model solved by linear theory that allows to simulate distribution and transport gas network in steady state considering isothermal regime. This model includes gas properties calculation, fitting losses by three-K model, head losses of safety relief valves and control valves, and the compressor map when pressure supply is required. In addition, an optimization tool is implemented, which uses an evolutionary algorithm that is able to find such a combination of diameters of

- X Desarrollo de una herramienta computacional para el dimensionamiento de gasoductos y redes de distribución de gas.
-

pipe, valves and compressors (if they are present in network) that minimize the value of an annualized cost objective function that takes in count capital cost and operating cost of network. Then, these two models are used to develop a computational tool that permits both, the gas network modeling and minimizing the cost associated with construction and operation of this. Finally, examples of networks studied in literature and designed in industrial level are solved using these two models achieving satisfactory results.

Keywords: Gas network, nodal balance, liner theory, simulation, optimization, evolutionary algorithm.

Contenido

	Pág.
1. Aspectos generales de gasoductos y redes de distribución de gas	7
1.1 Propiedades de gases.....	7
1.1.1 Factor de compresibilidad.....	7
1.1.2 Viscosidad.....	9
1.1.3 Peso molecular promedio.....	10
1.1.4 Relación de calores específicos.....	10
1.2 Componentes de una red de gas.....	11
1.2.1 Distribución, equipos y redes de gas natural.....	11
1.2.2 Tubería.....	13
1.2.3 Compresores y válvulas de control y seguridad.....	13
1.2.4 Accesorios.....	17
1.2.5 Factor de fricción.....	18
2. Modelamiento y optimización de redes de transporte y distribución de gas en estado estacionario	21
2.1 Planteamiento de redes de transporte y distribución de gas en estado estacionario.....	21
2.1.1 Modelo de balance de nodos o sistema de ecuaciones H.....	23
2.1.2 Modelo de balance de lazos o sistema de ecuaciones ΔQ	23
2.1.3 Modelo de balance simultáneo de lazos y nodos o sistema de ecuaciones Q.....	24
2.2 Solución de sistemas de ecuaciones.....	25
2.2.1 Método de Newton.....	25
2.2.2 Método de Hardy Cross.....	25
2.2.3 Método de Linealización de ecuaciones.....	26
2.3 Comparación de métodos de solución para los tres modelos de planteamiento de redes.....	26
2.4 Optimización de redes de gas.....	28
2.4.1 Métodos probabilísticos o estocásticos en optimización de redes de gas.....	29
2.5 Herramientas computacionales para el dimensionamiento de redes de transporte de gas.....	32
2.6 Investigaciones relacionadas con el modelado y optimización de redes de transporte y distribución de gas.....	34
2.7 Problema de investigación y objetivos.....	36
3. Modelo hidráulico para gasoductos y redes de distribución de gas	37
3.1 Desarrollo del modelo hidráulico.....	38
3.1.1 Elementos de tubería.....	38
3.1.2 Accesorios.....	42

3.1.3	Válvulas de seguridad	44
3.1.4	Válvulas de control	45
3.1.5	Compresores.....	47
3.2	Método de solución.....	50
3.3	Ejemplos de aplicación del modelo	53
3.3.1	Ejemplo 1. Red de Osciadacz	53
3.3.2	Ejemplo 2. Red de relevo de Kandell.....	56
3.3.3	Ejemplo 3. Gasoducto La Creciente, Tolú, Puerto Bahía	61
4.	Desarrollo del modelo de optimización.....	66
4.1	Modelo de optimización	66
4.1.1	Función objetivo	67
4.1.2	Restricciones del problema de optimización	69
4.1.3	Población	73
4.1.4	Operadores evolutivos.....	73
4.1.5	Criterio de convergencia.....	77
4.2	Ejemplo 1 de optimización – Red de Osciadacz	77
4.2.1	Verificación preliminar de las restricciones suaves.....	77
4.2.2	Características del modelo de optimización.....	79
4.2.3	Resultado de la ejecución del modelo de optimización.....	80
4.3	Ejemplo 2 de optimización – Red de Kandell	83
4.3.1	Verificación preliminar de las restricciones suaves.....	84
4.3.2	Características del modelo de optimización.....	84
4.3.3	Resultado de la ejecución del modelo de optimización.....	85
4.4	Ejemplo 3 de optimización Gasoducto La Creciente –Tolú-Puerto Bahía.....	92
4.4.1	Verificación preliminar de las restricciones suaves.....	93
4.4.2	Características del modelo de optimización.....	94
4.4.3	Resultado de la ejecución del modelo de optimización.....	94
5.	Implementación, descripción y uso de la herramienta computacional.....	99
5.1	Selección del entorno de desarrollo del software	99
5.2	Descripción y uso de la herramienta	101
5.2.1	Bases de datos.....	101
5.2.2	Cálculo de propiedades del gas	107
5.2.3	Módulo de cálculo hidráulico	108
5.2.4	Módulo de optimización.....	110
5.2.5	¿Cómo crear un caso de trabajo?	111
5.2.6	Rutinas de cálculo	114
5.2.7	Reportes que genera el programa.....	115
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
6.1	Conclusiones	118
6.2	Recomendaciones	119

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Valor k en función del Peso molecular del gas a distintas temperaturas (GPSA, 2012).....	10
Figura 1-2. Esquema clásico de distribución de gas natural.	12
Figura 1-3. Clasificación de los compresores según su funcionamiento (GPSA, 2012). .	14
Figura 1-4. Representación de la curva característica de un compresor centrífugo y un compresor recíprocante.....	14
Figura 2-1. Red de distribución de gas para planteamiento de modelos de redes en estado estable.....	22
Figura 2-2. Clasificación de las estrategias de optimización	29
Figura 3-1. Sección de tubería para el planteamiento de la ecuación general de flujo...	38
Figura 3-2. Representación de un accesorio para el planteamiento de las pérdidas por accesorios.....	42
Figura 3-3. Representación de una PSV para el planteamiento de la ecuación lineal para el cálculo de caída de presión.	44
Figura 3-4. Representación de una Válvula de Control para el planteamiento de la ecuación lineal de cálculo de caída de presión.....	45
Figura 3-5. Representación de un compresor para el planteamiento de la ecuación lineal de cálculo de diferencia de presión.	47
Figura 3-6. Red de Osciadacz	54
Figura 3-7. Red de relevo planteada por Kandell.....	57
Figura 3-8. Esquema gasoducto La Creciente – Tolú – Puerto Bahía.....	62
Figura 4-1. Genotipo de un individuo de 6 elementos de tubería	74
Figura 4-2. Genotipo del individuo mutado.	74
Figura 4-3. Individuos Padre y Madre.	75
Figura 4-4. Progenitor resultante de aplicar el operador cruce.....	75
Figura 4-5. Selección de las restricciones suaves para la verificación preliminar.....	78
Figura 4-6. Genotipo de un individuo cualquiera que se considera en el modelo de optimización.	79
Figura 4-7. Variación de la función objetivo del mejor individuo en función del número de generaciones.....	83
Figura 4-8. Genotipo de un individuo cualquiera que se considera en el modelo de optimización.	84
Figura 4-9. Variación de la función objetivo del mejor individuo en función del número de generaciones para la ejecución 1 del modelo acoplado de optimización.	91

Figura 4-10. Variación de la función objetivo del mejor individuo en función del número de generaciones para la ejecución 2 del modelo acoplado de optimización.	92
Figura 4-11. Genotipo de un individuo que se considera en el modelo de optimización.	94
Figura 4-12. Variación de la función objetivo del mejor individuo en función del número de generaciones.	98
Figura 5-1. Base de datos de tubería comercial de la herramienta desarrollada.	102
Figura 5-2. Base de datos de válvulas de control y válvulas de seguridad de la herramienta desarrollada.	104
Figura 5-3. Base de datos de compresores de la herramienta desarrollada.	105
Figura 5-4. Imagen de la base de datos de accesorios de la herramienta desarrollada.	106
Figura 5-5. Imagen de la hoja de cálculo de propiedades del gas.	107
Figura 5-6. Imagen de la hoja de cálculo hidráulico – sección introducción de elementos y nodos.	109
Figura 5-7. Imagen de la hoja de cálculo hidráulico – sección de esquema de la red y resultados.	109
Figura 5-8. Imagen de la hoja del módulo de optimización.	110
Figura 5-9. Imagen donde se muestra el formulario para seleccionar entre Modelar y Optimizar.	111
Figura 5-10. Imagen de la portada del software.	112
Figura 5-11. Imagen en donde se observan los dos formularios y los dos botones involucrados en los cálculos.	114
Figura 5-12. Imagen del reporte que genera el módulo de cálculo hidráulico.	115
Figura 5-13. Imagen del botón “Mostrar reporte de optimización para la generación i-ésima”	116
Figura 5-14. Imagen del reporte del módulo de optimización.	117

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Ecuaciones de estado para el cálculo de factor de compresibilidad.	8
Tabla 1-2. Composición y condiciones de presión y temperatura del gas transportado (ECOPEL, 2013).	9
Tabla 1-3. Ecuaciones para cálculo de pérdidas de carga por accesorios.	18
Tabla 2-1. Comparación de métodos de solución de sistemas de ecuaciones para los tres modelos de formulación.	27
Tabla 2-2. Comparación de estrategias más usadas en la optimización de redes de tubería.	31
Tabla 2-3. Software comercial para el modelado de redes de transporte y distribución de gas.	32
Tabla 3-1. Características de los elementos de tubería de la red.	54
Tabla 3-2. Información de los nodos de la red.	55
Tabla 3-3. Balance de nodos para la red planteada.	55
Tabla 3-4. Sistema de ecuaciones lineales.	55
Tabla 3-5. Flujos obtenidos con el modelo y los reportados por otros autores.	56
Tabla 3-6. Presiones obtenidas con el modelo y las reportadas por otros autores.	56
Tabla 3-7. Condiciones y propiedades del gas, y características de los elementos de tubería.	58
Tabla 3-8. Condiciones y propiedades del gas, y características de las válvulas de seguridad.	58
Tabla 3-9. Cantidad y tipo de accesorios en los elementos de la red.	58
Tabla 3-10. Constantes del método de 3-K para cálculo de pérdidas por accesorios.	58
Tabla 3-11. Presiones conocidas de la red.	59
Tabla 3-12. Balance nodal en términos de J y presiones conocidas.	59
Tabla 3-13. Comparación de flujos máxicos obtenidos en los elementos de tubería.	60
Tabla 3-14. Comparación de presiones obtenidas en los nodos de la red.	60
Tabla 3-15. Características del gas que se transporta el gasoducto.	61
Tabla 3-16. Características del compresor que conforma el elemento 1.	62
Tabla 3-17. Características de los elementos de tubería del gasoducto y propiedades promedio del gas en los elementos.	62
Tabla 3-18. Presión y flujos de suministro y entrega en los nodos del gasoducto.	63
Tabla 3-19. Balance nodal en términos de J y presiones conocidas.	63
Tabla 3-20. Comparación de los flujos obtenidos por el modelo hidráulico desarrollado y lo obtenido en el caso industrial típico.	63
Tabla 3-21. Comparación de las presiones obtenidas por el modelo hidráulico desarrollado y lo obtenido por el caso industrial típico.	64
Tabla 3-22. Comparación de las presiones obtenidas por el modelo hidráulico desarrollado y lo obtenido por el caso industrial típico al hacer particiones.	65
Tabla 4-1. Criterio de valor máximo del producto ρv^2 para el dimensionamiento de líneas de gas.	70
Tabla 4-2. Valor de C_e para distintos servicios.	72

Tabla 4-3. Valores de ρv^2 y V_{LE} para la configuración de red propuesta por Osciadacz (1987).	78
Tabla 4-4. Diámetros de los elementos de tubería de la red original y el óptimo obtenido en la ejecución del algoritmo evolutivo.	80
Tabla 4-5. Presiones en los nodos para la red original y para el óptimo obtenido.	81
Tabla 4-6. Flujos en los elementos para la red original y para el óptimo obtenido.	81
Tabla 4-7. Valor de la penalización y de la función objetivo con y sin penalización en (\$USD/año) para la red original y el óptimo obtenido.	82
Tabla 4-8. Valores de ρv^2 para la configuración de red propuesta por Kandell (1981). ..	84
Tabla 4-9. Diámetros de los elementos de tubería de la red original y el óptimo obtenido en la ejecución del algoritmo evolutivo.	86
Tabla 4-10. Presiones en los nodos para la red original y para el óptimo obtenido.	87
Tabla 4-11. Flujos en los elementos para la red original y para el óptimo obtenido.	88
Tabla 4-12. Valor del producto ρv^2 para la red original y para el óptimo obtenido en comparación con el máximo permitido.	89
Tabla 4-13. Valor de la función objetivo con y sin penalización para la red original y el óptimo obtenido.	90
Tabla 4-14. Valores de ρv^2 y V_{LE} , Presión de formación de hidratos para la configuración original del gasoducto.	93
Tabla 4-15. Diámetros de los elementos de tubería del gasoducto original y el óptimo obtenido en la ejecución del algoritmo evolutivo.	95
Tabla 4-16. Presiones en los nodos de la red original y del óptimo obtenido.	95
Tabla 4-17. Flujos en los elementos para la red original y para el óptimo obtenido.	95
Tabla 4-18. Valor de la penalización y de la función objetivo con y sin penalización para el gasoducto original y el óptimo obtenido.....	96
Tabla 5-1. Cotizaciones realizadas para la implementación del software de dimensionamiento de redes de gas.....	100

Lista de Símbolos

Símbolo	Definición	Unidad
P	Presión	Pa
μ_i	Viscosidad del gas i	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
μ_m	Viscosidad de la mezcla de gases	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
y_i	Fracción molar del gas i	-
ρ_i	Densidad del gas i	kgm^{-3}
ρ_m	Densidad de la mezcla gases	kgm^{-3}
v_g	Velocidad del gas	ms^{-1}
A_Y	Constante de Yaw para cálculo de viscosidad	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
B_Y	Constante de Yaw para cálculo de viscosidad	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$
C_Y	Constante de Yaw para cálculo de viscosidad	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-2}$
W^k	Flujo másico de la iteración k	kgs^{-1}
$ W ^{k-1}$	Valor absoluto del flujo másico de la iteración k-1	kgs^{-1}
J	Coefficiente lineal	$\text{kgPa}^{-1}\text{s}^{-1}$
P_i	Presión en el nodo i	Pa
P_j	Presión en el nodo j	Pa
Z_m	Factor de compresibilidad de la mezcla de gases	-
R	Constante universal de los gases	$8,31443 \frac{\text{kJ}}{\text{kgmolK}}$
T	Temperatura	K (Si no se indica lo contrario)
ID	Diámetro interno de tubería	m
L	Longitud	m
MW_m	Peso molecular de la mezcla de gases	kgkgmol^{-1}
$(P_{av})^{k-1}$	Presión promedio de la iteración k-1	Pa
F	Factor de fricción	-
$K_1, K_i \text{ y } K_d$	Constantes del modelo de las tres-K	-
K	Constante de pérdida por accesorios	-
D_n	Diámetro nominal del accesorio	m
Re	Número de Reynolds	-
ε	Rugosidad del material	m
z_i	Altura del nodo i	m
z_j	Altura del nodo j	m
g	Gravedad	9.8ms^{-1}
P_c	Presión crítica del gas	Pa
P_1	Presión a la entrada de la PSV	Pa
P_2	Presión a la salida de la PSV	Pa
P_{ATM}	Presión atmosférica	Pa
P_{SET}	Presión de ajuste de la PSV	Pa
k	Relación de calores específicos del gas (C_p/C_v)	-
K_v	Constante de la válvula de seguridad (Usualmente 0.975)	-
C_v	Constante de la válvula de control (suministrada por vendedor)	-
d_i	Diámetro de entrada a la válvula de control	m
d_j	Diámetro de salida de la válvula de control	m
D_i	Diámetro de la tubería a la entrada de la válvula de control	m
D_j	Diámetro de la tubería a la entrada de la válvula de control	m
C_{AECj}	Costo de capital anualizado de la estación de compresión j	$\text{\$USD año}^{-1}$
C_{ECj}	Costo de capital de la estación de compresión j	$\text{\$USD}$
V_{sc}	Valor de salvamento de la estación de compresión	$\text{\$USD}$
N	Tiempo de duración de la red o proyecto	Años
C_{APj}	Costo anualizado de consumo de potencia de la estación	$\text{\$USD año}^{-1}$

2 Desarrollo de una herramienta computacional para el dimensionamiento de gasoductos y redes de distribución de gas.

Símbolo	Definición	Unidad
	compresora j	
c_e	Costo de la energía	$\$USD W^{-1} año^{-1}$
cp	Coefficiente politrópico	-
T	Relación tiempo de operación de la estación de compresión por año	-
n_{pj}	Eficiencia politrópica de la estación de compresión j	-
Q	Flujo volumétrico de gas	MMSCFD
P_{j1}	Presión a la succión de la estación compresora j	Pa
P_{j2}	Presión a la descarga de la estación compresora j	Pa
T_{j1}	Temperatura a la succión de la estación compresora j	Pa
Z_{j1}	Factor de compresibilidad a la succión de la estación compresora j	-
Z_{j2}	Factor de compresibilidad a la descarga de la estación compresora j	-
F_I	Factor de costo de instalación de tubería y accesorios	-
K_f	Factor de costos operativos y de mantenimiento de tubería y accesorios	-
$\sum Ca_i$	Sumatoria de costos de los accesorios del elemento de tubería i	$\$USD$
C_{Ti}	Costo de capital de tubería por unidad de longitud para el elemento i	$\$USD m^{-1}$
C_{ATii}	Costo de capital de tubería instalada por unidad de longitud i	-
L_{Ti}	Longitud del elemento de tubería i	m
F	Factor de costo de instalación de tubería cuando no se tiene información de los accesorios	-
C_A	Costo anualizado de la red de gas	$\$USD año^{-1}$
ρv^2	Densidad por velocidad al cuadrado	Pa
V_{LE}	Velocidad límite de erosión	ms^{-1}
C	Constante para determinación de velocidad límite de erosión	-
SG	Gravedad específica del gas	-
PF_i	Factor de penalidad del elemento de tubería i	-
CV_i	Valor calculado del parámetro para el elemento de tubería i	-
CO_i	Valor de la restricción para el elemento de tubería i	-
M	Exponente de escalado para accesorios	-
NPS	Diámetro nominal de tubería o accesorio	Pulgadas

Introducción

A nivel industrial, el transporte y la distribución de gas son actividades que se realizan diariamente. Ejemplo de ello son los sistemas de distribución de aire para instrumentos y estaciones de servicio en plantas, los sistemas de relevo a tea en facilidades de producción petrolera y el transporte de gas natural desde los centros de producción hasta los sitios de consumo, entre otros. En 2012 este representó el 24% de la energía que consumió el mundo y fue la tercera fuente de energía más utilizada después del petróleo y el carbón (EIA, 2013). Adicionalmente, se proyecta que en el periodo 2010 a 2040 el consumo mundial tendrá un aumento cercano al 64 % (EIA, 2013). En lo que al mercado nacional respecta, en 2011 Ecopetrol invirtió cerca de 97 millones de dólares en el campo Gibraltar para la construcción de plantas de tratamiento de gas, la perforación del pozo Gibraltar 3 y la construcción del gasoducto Gibraltar-Bucaramanga (Ecopetrol, 2013).

En la mayoría de los países los sistemas de distribución y transporte de gas natural consisten en un conjunto de estaciones de compresión, tuberías y accesorios que operan en un amplio intervalo de presiones e interconectan los centros de producción con los puntos de consumo. La creciente demanda de gas natural por los consumidores de los sectores industrial, transporte y doméstico, precisa la construcción de infraestructura que además de cumplir con los requerimientos técnicos, reduzca los costos en su construcción y operación, lo cual puede lograrse mediante procedimientos de simulación y optimización. En el mercado existen diversas herramientas computacionales que se usan para el diseño de sistemas de tubería como ARROW ®, PIPE – PRO®, PLANTFLOW´s®, CHEMCAD Safety Net®, PIPEPHASE®, PIPE – FLO®, ASPEN HYSYS® - PIPESYS, ASPEN FLARE SYSTEM ANALYZER®, que pueden aplicarse en el dimensionamiento de gasoductos y redes de distribución de gas. No obstante ninguna permite, además del dimensionamiento, llevar a cabo la optimización de costos.

En lo que a la simulación respecta, permite predecir el comportamiento del sistema, en este caso una red, por medio de la aplicación de un modelo que representa la realidad y cuyas entradas y salidas se identifican con las señales propias del caso de estudio. En la

mayoría de los casos las entradas del modelo juegan el rol de variables independientes, razón por la cual la simulación puede usarse para guiar decisiones inherentes al diseño y operación del sistema. En la etapa de diseño de una red, la simulación ayuda a seleccionar una estructura, como en el caso de los diámetros de las tuberías cuando se conocen los valores de flujo y presión en los puntos de suministro y entrega del gas (entrada y salida de la red). La simulación también facilita la selección los compresores, válvulas de control y válvulas de seguridad que harán parte del sistema.

Por medio de la simulación también puede predecirse qué sucederá con un sistema ya instalado bajo una situación dada; es decir, cuáles serán sus salidas si se especifican los cambios en las variables de entrada. Por otra parte, es posible plantear el caso contrario en el que se requiere conocer cuáles serían los cambios que tendrían las variables de entrada, para cumplir requerimientos específicos en las variables de salida. El estudio de simulación puede considerarse como una fase de experimentación basado en un modelo y como se mencionó anteriormente, el fin de un experimento de simulación es dar respuesta a una pregunta concreta, planteada por el ingeniero que se encuentra analizando el sistema.

El control de un sistema de transporte de gas también requiere de simulación con el fin de obtener información acerca de las presiones y flujos en los puntos dados de la red. Teniendo en cuenta la variación del flujo en el sistema con él tiempo, se distinguen operaciones en estado estacionario y en estado transiente. El estado estacionario en redes de gas es descrito por sistemas de ecuaciones algebraicas, que por lo general son no lineales, y es relativamente simple plantear y más fácil de entender que el estado transiente. No obstante, en algunos casos la dinámica del fluido no puede ser despreciada sin cometer un serio error y se hace necesario utilizar un modelo dinámico, de mayor complejidad, que simule el sistema.

Por otra parte, con la ayuda de la simulación es posible plantear problemas de optimización, en los cuales se asocia una función objetivo, que generalmente involucra costos de compra e instalación de equipos y accesorios junto con costos de operación y mantenimiento del sistema, a las variables de entrada del problema con el fin de obtener los valores en las variables de respuesta que simultáneamente minimicen el valor de la función objetivo y cumplan con los requerimientos técnicos del problema.

Introducción

La simulación de redes de gas utiliza modelos de flujo en tuberías que han sido desarrollados basándose en leyes físicas que controlan los procesos de flujo. Sin embargo, en vista de la complejidad del problema (formulación de las ecuaciones, magnitud del problema, complejidad del modelo) en la mayoría de los casos no puede hacerse sin ayuda de un computador. Así, el objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de una herramienta computacional para el dimensionamiento de gasoductos y redes de transporte de gas en estado estacionario. Esta herramienta permite la obtención de configuraciones que minimicen los costos de compra, instalación, operación y mantenimiento asociados a la red cumpliendo con los requerimientos técnicos de diseño.

El presente documento, en seis capítulos, describe el desarrollo de los modelos hidráulico y de optimización y la implementación de la herramienta computacional. Inicialmente, en el capítulo 1 se tratan aspectos generales relacionados con gasoductos y redes de distribución de gas, tales como correlaciones para el cálculo de propiedades de gases, componentes típicos de una red de gas tales como compresores, tuberías, accesorios, válvulas de control y válvulas de seguridad. Finalmente se presentan las correlaciones para el cálculo del factor de fricción. En el capítulo 2 se plantea el problema de investigación mostrando los antecedentes que lo sustentan, se detallan los diferentes modelos de planteamiento y solución de redes de gas, las técnicas reportadas en la literatura para la optimización de este tipo de sistemas y el software disponible comercialmente.

En el capítulo 3 se presenta el modelo hidráulico desarrollado para la simulación de redes de gas y se muestra un ejemplo de aplicación de una red compuesta únicamente por tubería, un ejemplo de una red de relevo a tea y otro de un gasoducto que actualmente se encuentra en fase de construcción en la costa caribe colombiana. El capítulo 4 describe de manera detalla el modelo de optimización implementado el cual opera acoplado con el modelo hidráulico desarrollado en el capítulo 3, adicionalmente se realiza la optimización de una red de distribución compuesta únicamente por tubería, la red de relevo a tea y el gasoducto de la costa Caribe colombiana. Posteriormente el capítulo 5 detalla la implementación de la herramienta computacional, tomando como base los modelos hidráulico y de optimización desarrollados anteriormente. Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo y algunas recomendaciones

para el uso de la herramienta. Adicionalmente se enumeran aspectos que podrían ser objeto de investigación en trabajos posteriores que se relacionen con la temática abordada.

Los resultados de la investigación son la revisión detallada de aspectos teóricos relevantes, referentes al dimensionamiento de redes de gas, el modelo hidráulico y el modelo de optimización que componen la herramienta, y finalmente un software que permite el dimensionamiento y minimización de costos de gasoductos y redes de transporte de gas.

1. Aspectos generales de gasoductos y redes de distribución de gas

En este capítulo se presentan aspectos generales relacionados con gasoductos y redes de distribución de gas, tales como correlaciones para el cálculo de propiedades de gases, y los componentes típicos de una red de gas: Compresores, tuberías, accesorios, válvulas de control y válvulas de seguridad. Finalmente se presentan las correlaciones para el cálculo del factor de fricción.

1.1 Propiedades de gases

El cálculo de propiedades de gases es un aspecto relevante en el dimensionamiento de redes, debido a que la veracidad del valor de dichas propiedades afecta directamente los resultados que arroje el modelamiento del sistema ([Osiadacz A.J., 2001](#)). A continuación se presentan las expresiones matemáticas implementadas en la herramienta desarrollada para el cálculo de factor de compresibilidad, viscosidad, gravedad específica, peso molecular y relación de calores específicos de gases.

1.1.1 Factor de compresibilidad

El factor de compresibilidad también conocido como factor Z , es un valor que tiene en cuenta la desviación de la idealidad en el comportamiento de un gas en función de la presión y temperatura del sistema. El factor de compresibilidad se utiliza en el modelamiento de redes de gas para el cálculo del consumo de potencia de compresión y las pérdidas de presión en tuberías, válvulas de control y válvulas de seguridad. El valor de esta propiedad depende de la temperatura y presión del gas y se puede calcular por medio de tablas y gráficas generalizadas en función de temperaturas y presiones

reducidas. No obstante a pesar de ser metodologías sencillas y prácticas de realizar se convierten en procedimientos dispendiosos al momento de implementarlos en una herramienta computacional. Otra forma de establecer una rutina de cálculo para la determinación del factor de compresibilidad es el uso de ecuaciones de estado. Existe un gran número de ecuaciones desarrolladas por diversos investigadores (Wang J.L., 2003), En la Tabla 1-1, se listan las cuatro ecuaciones de estado más usadas entre el amplio número que se encuentran en la literatura. Estas se han obtenido de manera semiempírica y han probado determinar valores del factor Z que se ajustan al valor al real para un amplio número de sistemas gaseosos (Kayode C., 2007).

Tabla 1-1. Ecuaciones de estado para el cálculo de factor de compresibilidad.

Van der Waals	Soave-Redlich-Kwong	Peng-Robinson	Redlich-Kwong
$\left(p + \frac{a}{\hat{V}^2}\right)(\hat{V} - b) = RT$	$p = \frac{RT}{\hat{V} - b} - \frac{a'\lambda}{\hat{V}(\hat{V} + b)}$	$p = \frac{RT}{\hat{V} - b} - \frac{a\alpha}{\hat{V}(\hat{V} + b) + b(\hat{V} - b)}$	$p = \frac{RT}{\hat{V} - b} - \frac{a}{\hat{V}(\hat{V} + b)T^{1/2}}$
$a = \left(\frac{27}{64}\right)\frac{R^2T_c^2}{P_c}$	$a' = \frac{0,42747R^2T_c^2}{P_c}$	$a = 0,45724\frac{R^2T_c^2}{P_c}$	$a = 0,42747\frac{R^2T_c^2}{P_c}$
$b = \left(\frac{1}{8}\right)\frac{RT_c}{P_c}$	$b = \frac{0,08664RT_c}{P_c}$	$b = 0,07780\frac{RT_c}{P_c}$	$b = 0,08664\frac{RT_c}{P_c}$
	$\lambda = [1 + m(1 - \sqrt{T_r})]^2$	$\alpha = [1 + k(1 - \sqrt{T_r})]^2$	
	$m = 0,48508 + 1,55171\omega$	$k = 0,37464 + 1,54226\omega$	
	$- 0,1561\omega^2$	$- 0,26992\omega^2$	
	$T_r = T/T_c$		
	$\omega = \text{Factor acéntrico}$		

Fuente: Adaptación de Kayode C, Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, 2007, Volumen 1, Página 124.

Determinando el valor del volumen específico (\hat{V}) del gas a las condiciones de temperatura y presión del sistema con cualquiera de las ecuaciones de estado arriba nombradas, el factor de compresibilidad se calcula de la siguiente manera:

$$Z = \frac{P\hat{V}}{RT} \quad (1.1)$$

La ecuación desarrollada por Peng-Robinson es la que describe de mejor manera el comportamiento de gases derivados de hidrocarburos, como es el caso del gas natural (GPSA, 2012).

La Tabla 1-2 muestra la composición de un gas y las condiciones de presión y temperatura a las que se transporta desde La Creciente hasta Puerto Bahía en el departamento de Bolívar, Colombia.

El factor de compresibilidad calculado usando software certificado como Aspen Hysys® es 0.854, mientras que al usar la ecuación de Peng-Robinson se tiene un valor para el factor de compresibilidad de 0.850.

Tabla 1-2. Composición y condiciones de presión y temperatura del gas transportado (ECOPETROL, 2013).

Componente	Fracción molar
CO ₂	0,0009
Nitrógeno	0,0203
Metano	0,9735
Etano	0,0036
Propano	0,0007
i-Butano	0,0005
n-Butano	0,0003
i-Pentano	0,0002
Temperatura	80°F (300 K)
Presión	1.200 psig

1.1.2 Viscosidad

La viscosidad del gas es necesaria para calcular las pérdidas por fricción en tuberías, ya que con la viscosidad se calcula el número de Reynolds y con este el factor de fricción (Kayode C., 2007).

La correlación establecida por Yaws para el cálculo de la viscosidad de un gas en función de la temperatura se muestra en la ecuación (1.2) (Kayode C., 2007):

$$\mu_g = A + BT + CT^2 \quad (1.2)$$

Donde: μ_g : Viscosidad(μP), A, B y C : Constantes propias del gas y T : Temperatura(K)

El cálculo de viscosidad de mezcla se realiza por medio de la expresión de Hering y Zipperer (Narváz P., 1999):

$$\mu_m = \frac{\sum MF_i \mu_i \sqrt{MW_i}}{\sum MF_i \sqrt{MW_i}} \quad (1.3)$$

Donde:

μ_m : Viscosidad de la mezcla gaseosa, μ_i : Viscosidad del componente i ,

MF_i : Fracción molar del componente i y MW_i : Peso molecular del componente i

Utilizando las ecuaciones (1.2) y (1.3) se tiene que la viscosidad del gas de la Tabla 1-2, es 0,0113 cP, mientras que la calculada por medio de diagramas generalizados y nomogramas es 0,0136 cP. La viscosidad de los gases también se ve afectada por la presión, el Anexo B muestra la forma de corregirla por presión acorde a (GPSA, 2012).

1.1.3 Peso molecular promedio

El peso molecular promedio de la mezcla gaseosa se calcula por medio de la ecuación (1.4):

$$MW_{gas} = \sum y_i MW_i \quad (1.4)$$

Donde: y_i : Fracción molar del componente i y MW_i : Peso molecular del componente i

1.1.4 Relación de calores específicos

La relación de calores específicos de un gas, conocido como el factor de compresibilidad adiabática, se utiliza para el cálculo de la potencia consumida por un compresor. La Figura 1-1 muestra la relación entre este valor (k) y el peso molecular promedio del gas a distintas temperaturas para gases provenientes de hidrocarburos.

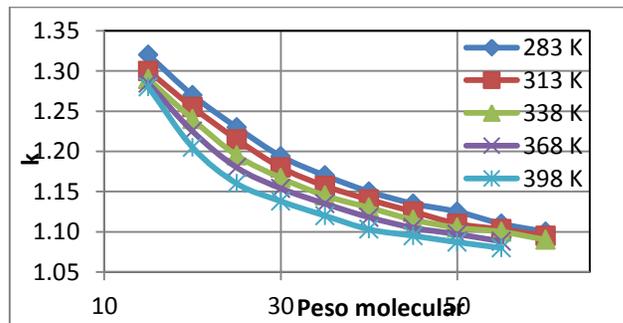


Figura 1-1. Valor k en función del Peso molecular del gas a distintas temperaturas (GPSA, 2012).

La ecuación (1.5) muestra el valor k en función del peso molecular del gas y la temperatura, esta función se obtiene de hacer una regresión con valores leídos directamente de la Figura 1-1 obteniéndose un coeficiente de regresión R^2 es de 0,99.

$$k = -0,0044MW - 0,00044T(K) + 1,4713 \quad (1.5)$$

1.2 Componentes de una red de gas

Cuando se realiza el modelamiento de redes de transporte y distribución de gas es necesario tener claro cuáles son los equipos y accesorios que componen este tipo de infraestructura. A continuación se hace una breve descripción de los componentes típicos de una red de gas tales como tuberías, compresores, válvulas y demás accesorios. Simultáneamente se presentan las expresiones matemáticas que describen el comportamiento de la presión en dichos componentes.

1.2.1 Distribución, equipos y redes de gas natural

La distribución del gas natural desde los centros de producción hasta los diferentes centros de consumo, requiere la instalación de una red de tuberías tendidas a lo largo de grandes extensiones de tierra, las cuales lo transportan hasta las ciudades y posteriormente lo distribuyen al usuario final ([Icontec, 2005](#)).

La Figura 1-2, muestra el esquema de distribución clásico de gas natural desde los centros de producción hasta el usuario final.

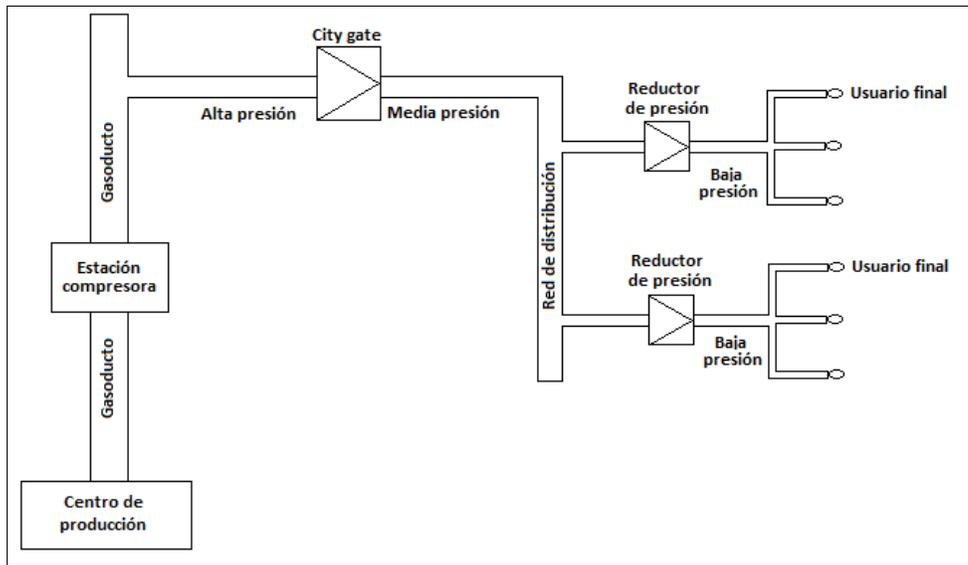


Figura 1-2. Esquema clásico de distribución de gas natural¹.

Las redes que transportan el gas natural desde los sitios de producción hasta los centros poblados se conocen con el nombre de gasoductos. Se caracterizan por tener diámetros de tubería de hasta 42" o más, manejar presiones cercanas a los 1.440 psig y contar con estaciones de compresión intermedias estratégicamente ubicadas que elevan sistemáticamente la presión del gas para compensar las pérdidas de carga debidas al transporte.

Cuando el gas proveniente de los gasoductos llega a los centros de recepción (*City Gates*), ubicados por lo general a las afueras de los centros poblados. En ellos se reduce la presión con que el gas viene del gasoducto a 250 psig, se divide en diferentes direcciones cuando hay más de un destino y se distribuye hacia los puntos de consumo final.

La infraestructura utilizada para la entrega del gas natural a nivel interno en las ciudades se conoce como red de distribución, compuesta por tuberías de diámetros menores a los de un gasoducto. Dicha red cuenta con reguladores que permiten reducir la presión del gas hasta valores que oscilan entre los 5 y 60 psi, y se encuentra dotada con dispositivos de seguridad, quemadores y accesorios como filtros, válvulas y codos.

¹ Construido a partir de la descripción de la Norma Técnica Colombiana NTC 2505.

1.2.2 Tubería

La tubería es el principal componente de las redes de transporte. En el mercado se encuentra disponible en distintos materiales tales como acero al carbón y aleaciones de acero inoxidable, entre otros, dependiendo de los requerimientos del gas que se transporta. Adicionalmente, para cada tipo de material, se tienen diversos diámetros nominales que van desde ½" hasta 42". Para el transporte de gas el *Schedule* mínimo permitido es 40 ([Icontec, 2005](#)).

La Tabla A1 del Anexo A muestra el diámetro nominal, *Schedule* y diámetro interno de las tuberías utilizadas para la elaboración de la herramienta computacional.

1.2.3 Compresores y válvulas de control y seguridad

Durante el transporte, las corrientes de gas pierden parte de su energía inicial debido a la fricción con la tubería, lo cual se traduce en una pérdida de presión. Esto se compensa con la instalación de estaciones de compresión. En otras ocasiones se tiene el caso contrario, en el que la reducción de presión del gas es necesaria, como para el gas que proviene de los centros de producción que debe ser entregado al consumidor a bajas presiones. Esto se logra gracias a válvulas de control que además de regular la presión permiten controlar el flujo y previenen el flujo en la dirección indeseada. También existen las válvulas de seguridad, las cuales evitan que se alcancen presiones mayores a las de diseño que puedan comprometer la integridad del sistema de transporte. Este tipo de válvulas se le conocen como PSV (*Pressure Safety Valve*). Las ecuaciones que describen el funcionamiento de los compresores y los dos tipos de válvulas mencionados se muestran en los literales a, b y c.

a) Compresores

Dependiendo del flujo o de los requerimientos de presión las redes de gas pueden requerir un único compresor o de varios conectados en paralelo, serie o en una combinación serie-paralelo. A este último esquema se le conoce con el nombre de estación de compresión. Los compresores utilizados a nivel industrial se clasifican en tres tipos principalmente, tal y como muestra la Figura 1-3 ([GPSA, 2012](#)).

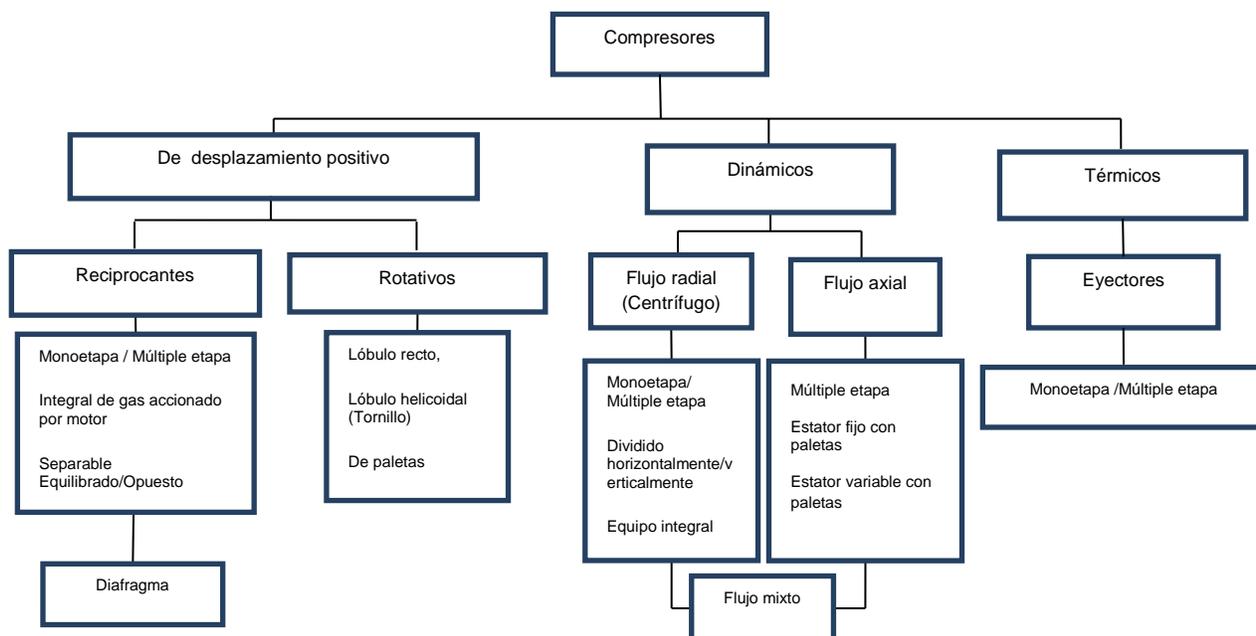


Figura 1-3. Clasificación de los compresores según su funcionamiento (GPSA, 2012).

La curva característica de un compresor es una representación gráfica de la relación existente entre la cabeza hidráulica que pueda proporcionar al fluido bajo ciertas condiciones de operación y el flujo volumétrico de ingreso al equipo. En la Figura 1-4 se muestra el comportamiento típico de las curvas características de un compresor centrífugo y de un compresor reciprocante. Como característica principal el compresor centrífugo opera en un amplio intervalo de caudales con variaciones pequeñas en la cabeza generada, mientras que el compresor reciprocante para un intervalo reducido de caudal presenta grandes variaciones en la cabeza generada.



Figura 1-4. Representación de la curva característica de un compresor centrífugo y un compresor reciprocante.

Fuente: Adaptado de (GPSA, 2012).

En esta gráfica se delimitan en líneas punteadas la región de *surge* y la región de *stonewall* o *shoke*, en las que para el compresor centrífugo se presentan problemas en su operación y por tal razón se debe evitar trabajar para estas condiciones de flujo. En la región de *surge* al manejarse presiones de descarga altas y caudales bajos, el compresor se desestabiliza presentándose cambios repentinos en el caudal manejado. Esta situación se presenta cuando en la descarga del compresor una válvula de corte se cierra, para evitar esto debe contarse con una válvula anti-*surge* (válvula de seguridad), que recircule la descarga del compresor a la succión del mismo (Torrella E., 2013). Un compresor centrífugo opera en la región de *stonewall* o *shoke* cuando la resistencia al flujo en la línea de descarga cae a un valor más bajo que el de los límites normales operación, esto puede presentarse cuando una válvula de control a la descarga del compresor falla y queda totalmente abierta, de tal manera que al manejarse bajas presiones de descarga y altos caudales de gas, el compresor se desestabiliza generando una intermitencia en el valor de la presión de descarga (EDE, 2013). La potencia consumida por el motor del compresor ya sea de tipo centrífugo o recíprocante se calcula por la ecuación (1.6):

$$P_c = 0,0857 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot Q T_1 \cdot \frac{Z_1 + Z_2}{2} \cdot \frac{1}{\eta_p} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (1.6)$$

$$\frac{n-1}{n} = \frac{k-1}{k\eta_p}$$

Donde

P_c : Potencia de compresión (HP), Q : Caudal de gas (MMSCFD), T : Temperatura ($^{\circ}R$)

La ecuación (1.6) es la más apropiada para el cálculo de potencia, ya que tiene en cuenta en el cálculo el factor de compresibilidad tanto en la succión como en la descarga del compresor. Adicionalmente utiliza el coeficiente de compresión politrópica y la eficiencia politrópica, valores que representan de manera muy aproximada la realidad del fenómeno de compresión (GPSA, 2012).

En ocasiones no se dispone de la eficiencia politrópica de manera que el coeficiente politrópico no puede ser calculado. Cuando se dispone de la eficiencia adiabática, puede usarse la ecuación (1.7) (Edgar T., 2001):

$$P_c = 0,0857 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot Q T_1 \cdot \frac{Z_1 + Z_2}{2} \cdot \frac{1}{\eta_a} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (1.7)$$

Donde η_a es la eficiencia adiabática del compresor.

Tanto la eficiencia politrópica (η_p) como la eficiencia adiabática (η_a) son valores que proporciona el fabricante del compresor y por lo general oscilan entre 0,75 y 0,85. La Tabla A2 del Anexo A muestra una lista de compresores disponibles en el mercado y la eficiencia reportada por el fabricante.

b) Válvulas de control

La ecuación (1.8) muestra la relación entre el flujo másico a través de una válvula de control y otras características de la misma junto con las propiedades del gas. Las ecuaciones (1.9) a (1.14) muestran el cálculo de las constantes involucradas en la determinación de la caída de presión a través de la válvula de control (Fisher, 2013).

$$W = \left(2,6333 \cdot 10^{-7} \cdot F_p \cdot C_v \cdot Y \cdot \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P_2) \cdot MW}{TZ}} \right) \quad (1.8)$$

$$Y = 1 - \frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{3 \cdot P_1 \cdot F_k} \quad (1.9)$$

X_T , factor de caída de presión, dado por el fabricante ($\approx 0,7$)

$$F_k = \frac{k}{1,4} \quad (1.10)$$

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum K_v C_v^2}{21,4}}} \quad (1.11)$$

$$\sum K = K_1 + K_2 + K_{B1} - K_{B2}$$

$$K_{B1} = 1 - \left(\frac{d_1}{D_1} \right)^4 \quad K_{B2} = 1 - \left(\frac{d_2}{D_2} \right)^4 \quad (1.12)$$

$$K_1 = 0,5 \left[1 - \left(\frac{d_1}{D_1} \right)^2 \right]^2 \quad (1.13)$$

$$K_2 = \left[1 - \left(\frac{d_2}{D_2} \right)^2 \right]^2 \quad (1.14)$$

P_1 y P_2 son las presiones a la entrada y a la salida de la válvula de control respectivamente.

c) Válvulas de seguridad

La ecuación (1.15) muestra la relación existente entre el flujo a través de una válvula de seguridad y la diferencia de presión entre la entrada y la descarga de la válvula, cuando se libera gas en condiciones de flujo subcrítico (API, 2000).

$$W = \frac{CKA\sqrt{P_1(P_1-P_2)MW}}{\sqrt{TZ}} \quad (1.15)$$

La condición de flujo subcrítico se tiene cuándo $P_2 < P_c$, en donde P_c se calcula como se muestra en la ecuación (1.16):

$$P_c = P_1 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/k-1} \quad (1.16)$$

P_1 y P_2 son las presiones a la entrada y a la salida de la válvula de seguridad respectivamente.

1.2.4 Accesorios

El paso forzoso de un fluido por un accesorio representa un consumo de energía, el cual se ve reflejado en una pérdida de presión a través de este. Dicha caída de presión, también conocida como pérdida de cabeza, es causada por la fricción entre el fluido y la pared del accesorio y por la creación de turbulencia en el cuerpo del fluido (Osiańcz A.J., 1987).

Las pérdidas debido a la fricción con la pared se manejan de buena manera como si el accesorio fuera una pieza de tubería recta de misma longitud física que el accesorio. Existen varios métodos para calcular las pérdidas por accesorios. En este documento se muestran cinco de ellos: Tres K, Dos K, Factor K, Longitud equivalente y el método de Crane.

La pérdida ocasionada por el accesorio se calcula por medio de la ecuación (1.17):

$$\Delta H = K v^2 / 2g \quad (1.17)$$

Cada uno de los cinco métodos mencionados utiliza la anterior expresión para el cálculo de la pérdida de cabeza. No obstante la diferencia radica en el cálculo de K. En la Tabla 1-3, se comparan las cinco estrategias de cálculo de este valor.

Tabla 1-3. Ecuaciones para cálculo de pérdidas de carga por accesorios.

Método	K	Características
Tres K	$K = \frac{K_1}{Re} + K_i \left(1 + \frac{K_d}{NPS^{0.3}(in)} \right)$	Ampliamente recomendado debido a que tiene en cuenta el efecto del Reynolds y el tamaño del accesorio, es más aproximado que el método de las dos-K en el efecto del escalado del tamaño del accesorio.
Dos K	$\frac{K_1}{Re} + K_\infty \left(1 + \frac{1}{ID(in)} \right)$	Aplica el factor de corrección ($1/ID$) reflejando un valor de K alto para tamaños pequeños y un valor de K casi constante para tamaños grandes, no obstante esta corrección no es la adecuada en un amplio rango de tamaños, tiene en cuenta el efecto del Reynolds.
Factor – K	$\left(f^L/D \right) + K_f$	No tiene en cuenta el efecto del Reynolds, por tanto el valor de K_f es constante y en realidad este puede ser alto para Re bajos y bajo para Re altos, adicionalmente no es exacto en el escalado de tamaños de accesorios.
Longitud equivalente (Antiguo)	fL_e/D	Asume que la influencia del Reynolds en las pérdidas en un accesorio es la misma que para una tubería. No es confiable al momento de realizar el escalado a distintos tamaños de accesorio.
Crane (Nuevo)	$\left(f^L/D \right) + K$	Confiable para alto niveles de turbulencia, pero es inadecuado para Reynolds bajos, refleja de manera adecuada la geometría del accesorio pero no lo hace de igual manera para la dependencia del Reynolds.

Fuente: Adaptado de (Hooper W., 1981, Kayode C., 2007).

1.2.5 Factor de fricción

El flujo de gas en tuberías puede variar de pequeños valores en sistemas de distribución a presiones bajas hasta grandes valores en sistemas de transporte a presión alta. Los primeros pueden tener un régimen de flujo laminar mientras que los de alta presión pueden presentar flujo turbulento. No obstante, la mayoría de los sistemas de distribución de gas operan en la región turbulenta (Narváez. P. y Galeano H., 2003).

En el flujo laminar la expresión de f (factor de fricción) es una función del número de Reynolds (Re) y está definida por la relación de Hagen – Poiseuille:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (1.18)$$

Para el régimen turbulento el factor de fricción depende del Re y la rugosidad relativa del material (ε_r) en que está hecha la tubería. La rugosidad relativa está definida como:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{ID} \quad (1.19)$$

Donde ε es la rugosidad efectiva e ID es el diámetro interno de la tubería.

Para condiciones de flujo de gas constante a través de una tubería de diámetro específico, Re es directamente proporcional al flujo de gas. De acuerdo con lo mostrado por [Wilson y Ellington \(1958\)](#), la región de flujo turbulento puede dividirse para cualquier valor de rugosidad relativa en dos regiones. Una en la cual el factor de fricción depende solamente de Re (Región parcialmente turbulenta) y que se representa por la ecuación (1.20):

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 4 \text{Log} Re \sqrt{f} - 0.6 \quad (1.20)$$

y otra en la cual el factor de fricción solo depende de la rugosidad relativa de la tubería (Región totalmente turbulenta) que es descrita por la ecuación (1.21):

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 4 \text{Log} \left(3,7 \frac{D}{\varepsilon} \right) \quad (1.21)$$

La transición entre estas dos regiones no está claramente definida, pero depende en alguna manera compleja de la geometría de la superficie de la tubería ([Osiaadacz A.J., 1987](#)). Las expresiones mostradas anteriormente, al igual que muchas otras reportadas en la literatura ([Mohitpour et al, 2000](#)), no permiten determinar de manera confiable el valor del factor de fricción para todos los regímenes de flujo (laminar, transición y turbulento), adicionalmente no se encuentran de manera explícita en términos de Re , sino que por el contrario se debe hacer un proceso iterativo para su determinación.

Por tal razón se opta por utilizar para la implementación de la herramienta la correlación propuesta por (Chen N., 1979), la cual aplica para todos los regímenes de flujo y se puede expresar de manera explícita para el factor de fricción.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \operatorname{Log} \left[\frac{\varepsilon}{3,70651D} - \frac{5,0452}{Re} \operatorname{Log} \left(\frac{1}{1,8257} \left(\frac{\varepsilon}{1D} \right)^{1,1098} + \frac{5,8506}{Re^{0,8981}} \right) \right] \quad (1.22)$$

Esta expresión ya ha sido utilizada en investigaciones relacionadas obteniéndose resultados satisfactorios, como en el caso de (Narváez P. et al, 1999).

2. Modelamiento y optimización de redes de transporte y distribución de gas en estado estacionario.

En el presente capítulo se muestran aspectos relacionados con el modelamiento y optimización de redes de transporte y distribución de gas en estado estacionario. En él se presentan las características de modelos descritos en investigaciones realizadas recientemente referentes al desarrollo de modelos de cálculo hidráulico de redes de distribución de gas al igual que para el software comercial utilizado para el dimensionamiento de redes de tubería. Finalmente se plantea el problema de investigación junto con los objetivos de la misma.

2.1 Planteamiento de redes de transporte y distribución de gas en estado estacionario.

El objeto principal del modelamiento de redes de transporte y distribución de gas en estado estacionario es predecir el comportamiento de los flujos y las presiones del sistema de tuberías bajo las condiciones de entrada a la red ([Osiadacz A.J., 1987](#)).

Hay dos leyes físicas que siguen el comportamiento de las redes de distribución de fluidos en estado estacionario:

1. La suma algebraica de los flujos en cualquier punto dentro de la red es cero.
2. La suma algebraica de las pérdidas de energía alrededor de un circuito es cero.

Estas dos leyes deben cumplirse independientemente del análisis. Para restringir el modelo al estado estable, es necesario que la suma algebraica de los flujos que entran y salen de la red sean cero ([Narváez P. et al, 1999](#)). Para el caso específico de redes de

gas, a pesar de manejarse régimen isotérmico, la suma debe plantearse en términos del flujo másico debido a que la densidad del gas es sensible a los cambios de presión que se dan a través de los elementos de la red.

En la literatura se describen tres maneras de hacer el planteamiento de problemas de modelamiento de redes en estado estable (Narváez P., 1998): Modelo de balance de nodos o sistema de ecuaciones H , modelo de balance de lazos o sistema de ecuaciones ΔQ y modelo de balance simultáneo de lazos y nodos o sistema de ecuaciones Q . La Figura 2-1 representa una red de distribución sencilla estudiada por Osiadacz (1987) que se usa como ejemplo para mostrar las tres formas de plantear el modelado de redes de gas. En ella W es flujo másico de gas a través de los diferentes elementos de tubería y L flujo másico de gas suministrado a la red o entregado por la red en los nodos.

En esta red los elementos son tuberías. En redes más complejas pueden encontrarse además válvulas de control, válvulas de seguridad y/o compresores. Los nodos representan el inicio o final de un elemento o la unión de dos o más elementos. Sobre los nodos se efectúan balances de masa mientras que en los elementos se calculan pérdidas de carga (Narváez P., 1998).

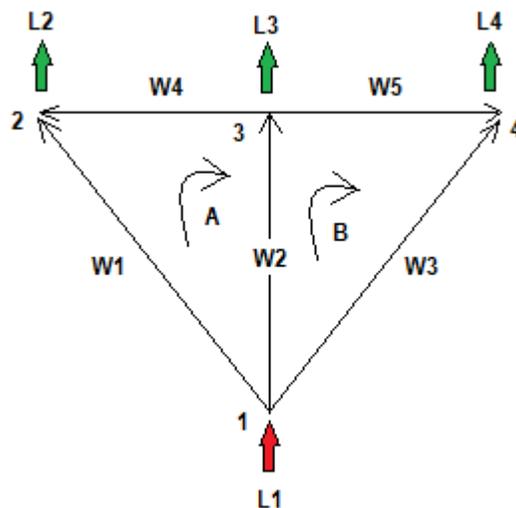


Figura 2-1. Red de distribución de gas para planteamiento de modelos de redes en estado estable.

Fuente: Adaptada de (Osiadacz A.J., 1987)

2.1.1 Modelo de balance de nodos o sistema de ecuaciones H

La primera ley física mencionada antes establece que la suma algebraica de flujos másicos en un punto dentro de la red es cero. Esto significa que para cualquier nodo de la red la suma del flujo de los elementos de tubería que entran es igual a la suma de los que salen del nodo (Osiadacz A.J., 1987). Al plantear el balance de materia en cada nodo del esquema de red de la Figura 2-1 suponiendo el cumplimiento del balance de energía se obtiene el conjunto de ecuaciones (2.1):

$$\begin{aligned}
 -W_1 - W_2 - W_3 &= -L_1 \\
 W_1 &+ W_4 &= L_2 \\
 W_2 &- W_4 - W_5 &= L_3 \\
 W_3 &+ W_5 &= L_4
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

El modelo de balance de nodos presenta dos ventajas, la primera es que es aplicable a redes abiertas, cerradas o una combinación de ambas. La segunda es que al tener la relación entre flujo másico y diferencia de presión en los elementos permite fácilmente programar rutinas de cálculo sencillas.

2.1.2 Modelo de balance de lazos o sistema de ecuaciones ΔQ

Con base en la segunda ley física enunciada anteriormente que establece que la suma algebraica de las pérdidas de energía alrededor de un circuito es cero. Se plantea y se resuelve el balance de energía en los lazos A y B que se muestran en la Figura 2-1 con la premisa de que el balance de materia se cumple (Narváez P. et al, 1999).

En el esquema de la red se observa que los dos lazos son cerrados ya que inician y finalizan en el nodo 2, por tanto no puede haber caída de presión a través del lazo. El balance para cada lazo se representa en el conjunto de ecuaciones (2.2). En donde ΔP_i es la caída de presión en el elemento i de la red:

$$\begin{aligned}
 \text{Lazo A: } & -\Delta P_1 + \Delta P_2 &+ \Delta P_4 &= 0 \\
 \text{Lazo B: } & & -\Delta P_2 + \Delta P_3 &- \Delta P_5 = 0
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

El modelo de balance de lazos requiere rutinas de programación adicionales para la identificación de lazos y pseudolazos, adicionalmente solo es aplicable a secciones cerradas de una red.

2.1.3 Modelo de balance simultáneo de lazos y nodos o sistema de ecuaciones Q

Considerando que una red que está compuesta por n nodos, n_1 nodos de energía conocida y n_2 nodos de energía desconocida ($n = n_1 + n_2$), l lazos y m elementos de tubería que pueden tener válvulas, accesorios y/o compresores, dicha red cumple la ecuación (2.3) (Narváez P. et al, 1999):

$$m = (n_1 - 1) + n_2 + l \tag{2.3}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, las dos leyes físicas que siguen el comportamiento de redes de distribución de fluidos y el cumplimiento de los balances de materia y energía, el planteamiento de balance simultáneo de lazos y nodos se realiza eliminando una de las ecuaciones del conjunto de ecuaciones (2.1), para este caso en específico se elimina la relativa al balance del nodo 1, las tres ecuaciones restantes se combinan con el sistema de ecuaciones (2.2) reemplazando la relación entre el flujo y la caída de presión a través de un elemento que se muestra en la ecuación (2.4):

$$\Delta P_j = a_j W_j^n \tag{2.4}$$

Para el caso de líquidos el balance puede realizarse en términos del caudal y no necesariamente de flujo másico como se efectúa para gases.

El conjunto de ecuaciones (2.5) representa el planteamiento simultáneo de lazos y nodos en términos del flujo másico para el esquema de red de la Figura 2-1., considerando lo mencionado anteriormente:

$$\begin{array}{rcccc}
 W_1 & & & + W_4 & - L_2 = 0 \\
 & W_2 & & - W_4 & - W_5 - L_3 = 0 \\
 & & W_3 & & + W_5 - L_4 = 0 \\
 - a_1(W_1)^n + a_2(W_2)^n & & & + a_4(W_4)^n & = 0 \\
 & - a_2(W_2)^n + a_3(W_3)^n & & & - a_5(W_5)^n = 0
 \end{array} \tag{2.5}$$

El modelo de balance simultáneo maneja un número mayor de ecuaciones en el cálculo lo cual incrementa el número de cálculos a realizar para solucionar el sistema,

adicionalmente al igual que el modelo de balance de lazos requiere rutinas extras de programación para la identificación de lazos y solo aplica para redes cerradas.

2.2 Solución de sistemas de ecuaciones

Una vez se tiene el planteamiento de la red es necesario contar con métodos que realicen la solución del sistema de ecuaciones resultante. Los métodos de solución han ido evolucionando paralelamente con el desarrollo de los computadores, a continuación se describen los tres métodos estudiados por diferentes autores para la solución de sistemas de ecuaciones planteadas por cualquiera de los tres modelos presentados en el numeral 2.1 ([Lam C. et al, 1972](#), [Wood D. J. et al, 1981](#) y [Schroeder D., 1992](#)):

2.2.1 Método de Newton

Dependiendo del planteamiento de redes que se trabaje, en la implementación de este método inicialmente se suponen valores de presión en los nodos de presión desconocida o flujos máxicos en los elementos de la red. Seguidamente se determinan los errores asociados a los flujos o presiones supuestas y se comparan con el criterio de tolerancia establecido, en el caso en el que no se cumple el criterio para todos los errores asociados se calculan los coeficientes de la matriz Jacobiana la cual está compuesta por derivadas parciales. Con esta matriz se calculan los términos de corrección, se aplican las correcciones a los valores iniciales supuestos de presión o flujo máxico según corresponda y se efectúa nuevamente la rutina de cálculo hasta alcanzar el nivel de tolerancia fijado ([Lam C. et al, 1972](#)).

Este método presenta la desventaja de que es sensible a los valores supuestos inicialmente ([Conde y Schiavi, 2013](#)) lo cual repercute directamente en el número de iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia y deja abierta la posibilidad de obtener soluciones sin sentido físico.

2.2.2 Método de Hardy Cross

Este método es similar al método de Newton, no obstante realiza la corrección de manera individual y no de manera simultánea utilizando solamente los términos de la diagonal de la matriz Jacobiana. Esto hace que su convergencia sea más lenta y a su vez se requieran mayores tiempos de cálculo y una capacidad mayor de memoria para

almacenamiento de datos en comparación con el método de Newton, debido a que una iteración no se considera terminada hasta tanto no se haya aplicado el factor de corrección a todas y cada una de las variables del sistema (Osiadacz A.J., 1987). Para redes sencillas este método de solución se utiliza junto con el modelo de balance de lazos, ya que para estas por lo general el número de lazos es menor al de nodos y por tanto la cantidad de cálculos a efectuarse es menor (Schroeder D., 1992).

2.2.3 Método de Linealización de ecuaciones

Este método utiliza la teoría lineal de redes para expresar la relación entre el flujo y la diferencia de presiones. Para esto se hace una transformación en dicha relación de manera que se tenga grado 1, los métodos de Newton y Hardy-Cross no efectúan esta transformación trabajando la relación entre flujo y diferencia de presión con grado 1/2. Luego de realizada la transformación se suponen valores para las variables desconocidas, con estos valores iniciales se conforma una matriz que al solucionarse por cualquier método matemático se obtienen las presiones o flujos desconocidos según corresponda. Seguidamente se definen los valores de tolerancia y se comparan con el criterio de parada y en caso de no cumplirse, se toman los valores de presión y/o flujos calculados y se conforma nuevamente la matriz, realizándose el mismo procedimiento hasta cumplir con el criterio de parada establecido (Wood D. J. et al, 1981).

La linealidad (orden 1) hace que la convergencia sea rápida y computacionalmente más eficiente que los otros dos métodos descritos. Adicionalmente esto hace que el método no sea sensible a los valores supuestos inicialmente (Camacho, 1989, Narváez. P. y Galeano H., 2003).

2.3 Comparación de métodos de solución para los tres modelos de planteamiento de redes

La Tabla 2-1 muestra la comparación entre los métodos de solución de sistemas de ecuaciones expuestos para cada uno de los modelos de formulación del numeral 2.1 (Balance de nodos, Balance de Lazos y Balance simultáneo de Lazos y Nodos).

Tabla 2-1. Comparación de métodos de solución de sistemas de ecuaciones para los tres modelos de formulación.

Método de solución	Hardy-Cross			Newton			Linealización de ecuaciones		
Modelo	Nodos	Lazos	Simultaneo Nodos y Lazos	Nodos	Lazos	Simultaneo Nodos y Lazos	Nodos	Lazos	Simultaneo Nodos y Lazos
N° de ecuaciones	H n_2 =nodos de energía desconocida	ΔQ $l-n_1-1$ =Lazos y seudolazos	Q $m=n_2+l+n_1-1$ # elementos	H n_2 =nodos de energía desconocida	ΔQ $l-n_1-1$ =Lazos y seudolazos	Q $m=n_2+l+n_1-1$ # elementos	H n_2 =nodos de energía desconocida	ΔQ $l-n_1-1$ =Lazos y seudolazos	Q $m=n_2+l+n_1-1$ # elementos
Resultados que arroja la solución del sistema	Distribución de presiones en los nodos de la red.	Flujos de lazo (Variable no real)	Distribución de flujos en los elementos de la red	Distribución de presiones en los nodos de la red.	Flujos de lazo (Variable no real)	Distribución de flujos en los elementos de la red	Distribución de presiones en los nodos de la red.	Flujos de lazo (Variable no real)	Distribución de flujos en los elementos de la red
Suposiciones iniciales	Valores de presiones en cada nodo que cumple con el balance de energía.	Distribución inicial de caudales que cumplen con la ecuación de continuidad	Valores de presiones en cada nodo que cumple con el balance de energía.	Valores de presiones en cada nodo que cumple con el balance de energía.	Distribución inicial de caudales que cumplen con la ecuación de continuidad	Valores de presiones en cada nodo que cumple con el balance de energía.	Valores racionales de flujo en los elementos para garantizar convergencia.	Distribución inicial de caudales que cumplen con la ecuación de continuidad	Valores racionales de flujo en los elementos para garantizar convergencia.
Orden del sistema	$\frac{1}{2}$	2	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	2	$\frac{1}{2}$	1	1	1
Matriz Jacobiana	No se plantea	No se plantea	No se plantea	Se plantea	Se plantea	Se plantea	No se plantea	No se plantea	No se plantea
Necesidad de rutinas extras al programar	Ninguna	Identificación de lazos, transformación de flujos de lazo en variables reales	Ninguna	Ninguna	Identificación de lazos, transformación de flujos de lazo en variables reales	Ninguna	Ninguna	Identificación de lazos, transformación de flujos de lazo en variables reales	Ninguna
Convergencia	Lenta, posibles problemas con el factor de corrección.	Lenta, posibles problemas con el factor de corrección.	Lenta, posibles problemas con el factor de corrección.	Intermedia, limitada por el orden del sistema	Intermedia, limitada por el orden del sistema	Intermedia, limitada por el orden del sistema	Rápida	Rápida	Rápida

Fuente: Adaptado de (Narváez. P. y Galeano H., 2003)

2.4 Optimización de redes de gas

En el diseño de redes de transporte y distribución de gas es común encontrar casos en los que es necesario hallar valores de las variables de diseño (diámetros de tubería, tipo de compresor, tamaños de válvulas de control y/o seguridad) que minimicen una función objetivo que puede ser el consumo de potencia por compresión de la red o los costos anualizados de la construcción, operación y mantenimiento de la misma. La función objetivo está sujeta a restricciones de igualdad o desigualdad, que por lo general están dadas por condiciones de tipo operacional, disponibilidad de tuberías, válvulas y equipos de compresión (Edgar T., 2001).

Para solucionar problemas de optimización se distinguen principalmente dos grandes grupos de estrategias. El primero lo componen los modelos determinísticos o tradicionales, los cuales utilizan operaciones matemáticas que involucran derivadas y/o productos entre matrices que dependiendo de la complejidad del problema pueden llegar a generar una alta carga computacional. Adicionalmente la mayoría de las veces los óptimos alcanzados por estos métodos no corresponden a óptimos globales del problema sino a óptimos locales (Martínez C., 2011).

El segundo grupo de estrategias corresponde a los modelos probabilísticos o estocásticos de los cuales se derivan muchas técnicas actuales denominadas modernas o no tradicionales. Todas estas tienen en común que están basadas en ciertos sistemas biológicos, moleculares, sociales y neuronales que se encuentran comúnmente en la naturaleza. La principal ventaja que tiene el uso de estas estrategias es que permiten hallar soluciones cercanas al óptimo global en funciones objetivo que no son continuas ni diferenciables dentro de la región factible, en problemas en los cuales las variables de optimización pueden ser continuas o discretas (Carnero *et al*, 2005). Las estrategias estocásticas proporcionan buenas soluciones a problemas complejos, no obstante están sujetas a un alto consumo de tiempo y esfuerzo computacional, entre tanto los procedimientos determinísticos con rutinas de cálculo simples logran obtener soluciones a problemas sencillos con variables de optimización continuas, pero presentando limitaciones en problemas de alta complejidad en los que se manejan variables discretas (Singiresu R., 2009). La Figura 2-2 representa la clasificación de las estrategias de optimización. Adicionalmente, muestra algunas de las más usadas tanto de tipo determinístico como de tipo estocástico.

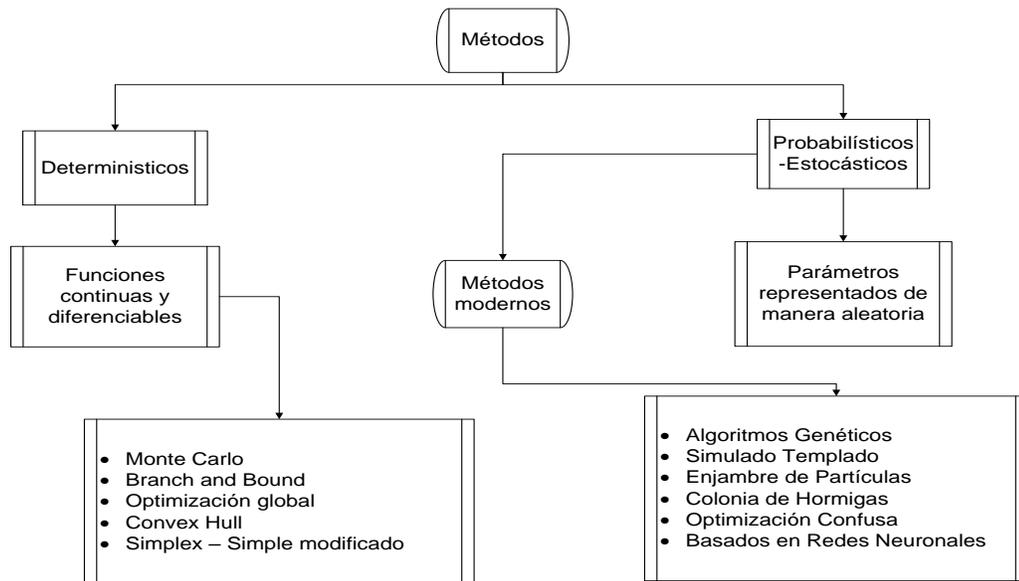


Figura 2-2. Clasificación de las estrategias de optimización

Fuente: Adaptado de (Edgar T., 2001)

2.4.1 Métodos probabilísticos o estocásticos en optimización de redes de gas

Como se mencionó anteriormente, las técnicas probabilísticas o estocásticas presentan un buen desempeño en la obtención de soluciones a problemas de optimización con variables discretas y funciones objetivo no derivables y discontinuas, como lo es el caso específico de las redes de gas (Singiresu R., 2009), a continuación se hace una breve descripción y comparación de las técnicas estocásticas más usadas para la optimización de estos sistemas físicos. Dentro de las estrategias de optimización probabilísticas se encuentran los algoritmos genéticos o evolutivos, el templado simulado, el enjambre de partículas, la colonia de hormigas, la optimización difusa y las técnicas basadas en redes neuronales. No obstante para la optimización de redes de tubería las técnicas más usadas en la actualidad son los algoritmos genéticos o evolutivos, el simulado templado y el enjambre de partículas (Martin F.A., 2006 y Mateos A., 2012). A continuación se hace una breve descripción de estas tres estrategias:

a) Algoritmos evolutivos o genéticos (EA o GA)

Esta técnica se basa en la teoría de la evolución de Darwin y consiste en la creación de una población inicial de individuos cuya información genética corresponde a una

combinación de las variables de optimización. La dinámica de optimización se basa en la aplicación de tres operadores generacionales: *Cruce*, *Mutación* y *Selección*. El primero consiste en generación de un individuo hijo a partir del cruce de la información genética de dos individuos padres, en el segundo lo que se tiene es una variación aleatoria de una o más de las variables que componen al individuo y el tercero consiste en la selección de los mejores individuos basándose en el valor de la función objetivo. La selección corresponde por lo general a un ordenamiento de mejor a peor valor de función objetivo. Una vez se aplican los tres operadores generacionales se crea una segunda generación, los operadores se aplican nuevamente hasta alcanzar el criterio de parada, que puede ser el número de generaciones evaluadas, el tiempo de cálculo, el cambio del mejor individuo entre generaciones sucesivas, y la diversidad de la población, que consiste en comparar el mejor y el peor individuo de una misma generación. El óptimo corresponde al individuo con mejor valor de función objetivo de la última generación evaluada. Por otra parte, una de las principales dificultades que se presentan en la aplicación de estrategias de optimización estocásticas, es la solución de problemas con restricciones. Los algoritmos evolutivos controlan esta dificultad por medio del uso de una expresión de penalización, la cual afecta de manera desfavorable el valor de la función objetivo en individuos que no cumplen con una o más de las restricciones del problema, sin descartar de manera permanente a dicho individuo de la población ([Martínez C., 2011](#)).

b) Templado Simulado (SA)

El nombre e inspiración de esta técnica viene del proceso de recocido del acero, que consiste en calentar y luego enfriar lentamente el material para variar sus propiedades físicas. El calor causa que los átomos aumenten su energía y que puedan así desplazarse de sus posiciones iniciales (óptimo local). El enfriamiento lento les da mayores probabilidades de recristalizar en configuraciones con menor energía que la inicial (óptimo global) ([Sanvicente H. et al, 2002](#)).

En cada iteración el método evalúa algunos vecinos del estado actual s y probabilísticamente decide entre efectuar una transición a un nuevo estado s' o quedarse en el estado s . Típicamente la comparación entre estados vecinos se repite hasta que se encuentre un estado óptimo que minimice la energía del sistema o hasta que se cumpla cierto tiempo computacional. El vecindario de un estado s está compuesto por todos los estados a los que se pueda llegar a partir de él mediante un cambio en la conformación del sistema. Los estados vecinos son generados mediante métodos de Montecarlo. El

problema con este método es que no puede asegurar que la solución encontrada sea un óptimo global, pues el espacio de búsqueda explorado no abarca todas las posibles variaciones del sistema (Bertsimas D. y Tsitsiklis J., 1993).

c) Enjambre de partículas (PSO)

El enjambre de partículas es una técnica meta-heurística que supone pocas o ninguna hipótesis sobre el problema a optimizar y puede aplicarse en grandes espacios de soluciones candidatas. Sin embargo, no garantiza la obtención de una solución óptima en todos los casos. El enjambre de partículas permite optimizar un problema a partir de una población de soluciones candidatas, denotadas como "partículas", que se mueven por todo el espacio de búsqueda según reglas matemáticas que tienen en cuenta la posición y la velocidad de las partículas. El movimiento de cada partícula se ve influido por su mejor posición local hallada hasta el momento, así como por las mejores posiciones globales encontradas por otras partículas a medida que recorren el espacio de búsqueda. El fundamento teórico de esto es hacer que la nube de partículas converja rápidamente hacia las mejores soluciones (Martin F.A., 2006). El principio de funcionamiento de esta estrategia es similar al de la técnica *Colonia de Hormiga* (ACO). La Tabla 2-2 muestra una comparación entre las tres estrategias de optimización descritas.

Tabla 2-2. Comparación de estrategias más usadas en la optimización de redes de tubería.

Estrategia	GA ó EA	SA	PSO
Concepto de simulación	Evolución de las especies	Templado de metales	Interacción social
Garantiza solución óptima	No	No	No
Operadores	Cruce, mutación, selección	Función de enfriamiento	Velocidad
Factores que influyen en la diversidad	Probabilidad de cruce y probabilidad de mutación	Ruta de enfriamiento	Inercia
Parámetros a ajustar	Muchos	Pocos	Pocos
Solución de problemas con restricciones	Se presenta dificultad, pero con el empleo de una penalización en la función objetivo puede superarse	Presenta dificultad	Presenta dificultad
Criterio de parada	Número máximo de generaciones. Tiempo de cálculo. Mejor individuo entre generaciones. Diversidad de la población.	Mínimo de energía alcanzado. Límite de esfuerzo computacional	Grado de concentración del enjambre hacia un punto en el espacio de búsqueda. Mejor posición global que se acerca al óptimo del problema

Fuente: Adaptado de (Martín F.A., 2006)

2.5 Herramientas computacionales para el dimensionamiento de redes de transporte de gas.

En el mercado hay una amplia oferta de herramientas computacionales utilizadas en el modelado de gasoductos y redes de distribución de gas. Sin embargo ninguna de ellas permite, además del modelado, realizar la minimización de costos. La Tabla 2-3 muestra algunas de las herramientas más comunes usadas tanto a nivel comercial como académico. También se presentan algunas características, como el nombre del fabricante y el sitio web donde puede encontrarse información más detallada.

Tabla 2-3. Software comercial para el modelado de redes de transporte y distribución de gas.

Software	Características	Fabricante	Sitio web/Fuente
ARROW®	<ul style="list-style-type: none"> • Manejo de fluidos tales como vapor de aguas, aire, gas natural y gases químicos y petroquímicos en régimen adiabático e isotérmico. • Permite la selección de compresores, intercambiadores de calor, válvulas de control y otros accesorios, cubriendo un amplio intervalo de presiones de trabajo. • Utiliza una matriz de iteración de Newton-Raphson modificada para la solución de problemas de dimensionamiento. • Cuenta con una biblioteca propia de gases que puede ampliada y modificad. Un módulo opcional Chempak ® una base de datos termo-físicos de 600 gases que permite definir mezclas no reactivas. • Permite calcular costos de tubería y demás componentes del sistema junto con el cálculo de costos asociados a potencias de compresión. • Útil para el dimensionamiento de tuberías, válvulas de alivio, válvulas de control, compresores y ventiladores, tiene en cuenta cambios de altura en la red. 	Applied Flow Technology	http://www.aft.com/products/arrow
PIPE-FLO® Compressible	<ul style="list-style-type: none"> • Simula la operación de sistemas de tubería que transportan fluidos compresibles como vapor y gases. No tiene límite en cuanto al número de líneas que pueden ser manejadas proporcionando resultados confiables para sistemas en serie, ramales, lazos (abiertos y cerrados). • Calcula las propiedades físicas del gas tal cual fluye a través del sistema de tubería. • El programa simula la operación del sistema total de tuberías mostrando la interacción de compresores, tuberías y válvulas de control. • Utiliza el método de Hardy-Cross para la solución de problemas de dimensionamiento. 	Engineered Software, Inc.	http://www.eng-software.com/products/pipeflo/compressible/
PLANTFLOW's®	<ul style="list-style-type: none"> • Útil para diseñar y analizar redes de tubería tanto de líquido como de gas incluyendo lazos abiertos y cerrados. Con redes de hasta 2500 elementos de tubería y/o 500 nodos. • Permite la construcción de sistemas de tubería de cualquier tamaño o complejidad, calculando presiones, temperaturas y velocidades a través de los elementos de la red y evaluando varias alternativas de diseño. • Algunas de las aplicaciones típicas incluye el dimensionamiento de diámetro óptimo, selección de equipos, dimensionamiento de válvulas y análisis de ecuilización de flujo en múltiples y 	Ceanet	http://www.ceanet.com.au/Products/BentleySystems/PlantFlow.aspx

Software	Características	Fabricante	Sitio web/Fuente
PLANTFLO W's®	<p>cabezales. Cálculo de potencia para bombas y compresores.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utiliza el modelo de balance de nodos y emplea el método de Newton para solucionar el sistema. • Uso de ecuaciones de AGA-8 y Peng-Robinson para el cálculo del factor de compresibilidad y propiedades termodinámicas de los gases. Emplea la ecuación de Darcy Weisbach para el cálculo del factor de fricción y Hazen-Williams, Weymouth, Panhandle A y B para el cálculo de pérdidas de presión. 	Ceanet	http://www.ceanet.com.au/Products/BentleySystems/PlantFLOW.aspx
CHEMCAD Safety Net	<ul style="list-style-type: none"> • Interfaz gráfica para facilitar la entrada de datos, posee una base de datos de 1900 compuestos, emplea la ecuación de flujo isotérmico para líneas de transporte largas, calcula factor de fricción con la ecuación de Darcy - Weisbach y realiza el cálculo de caídas de presión a la entrada y a la salida de las tuberías. • Para hidrocarburos tiene disponible los paquetes termodinámicos de Peng-Robinson, Soave-Redlich-Kwong, API Soave, Grayson-Streed, Maxwell-Bonnell, BWRS y K-Charts. • Cálculo de presiones en nodos que componen la red. Cuenta con varios modelos para el cálculo de caída de presión a través de un segmento de tubería o un conjunto de segmentos, para una y dos fases. • Calcula caídas de presión en válvula y accesorios. Cálculo de caídas de presión y determinación de flujo a través de válvulas de control. • Uso de la ecuación de Darcy - Weisbach para el cálculo del factor de fricción en flujo monofásico sea compresible o incompresible. Métodos de Baker y de Beggs y Brill para el flujo de dos fases. • Ecuación de flujo isoterma para transmisión en líneas de larga distancia. Ecuación de Hazen Williams para sistemas de protección contra incendios. Usa la ecuación Fritzsche para la evaluación de la caída de presión en sistemas de vapor. Realiza el diseño y evaluación de válvulas de alivio y discos de ruptura. 	Technotrade	http://www.technotrade.com.pk/18/CHEMCAD_SAFETY_NET_Plant_safety_and_Piping_Networks_Software/
PIPEPHASE®	<ul style="list-style-type: none"> • Realiza el modelado riguroso e integral para flujos multifásicos de estado continuo en redes de acopio de petróleo y gas y sistemas de tuberías. • Usa algoritmos de solución probada, métodos modernos de producción y técnicas de análisis de software para crear una herramienta robusta de planificación y diseño de campo de petróleo. • Aplicable a redes de inyección de CO₂ o vapor como único componente, mejora el diseño de las instalaciones y las tuberías, reduce los costos de capital y de operación de las redes, simula redes de acopio de gas y petróleo y de distribución y transmisión de gas natural, realiza análisis de sensibilidad y permite el dimensionamiento de líneas. 	Invensys™	http://iom.invensys.com/LA/pages/SimSci_ProcessEngSuite_PIPEPHASE.asp
ASPEN FLARE SYSTEM ANALIZER®	<ul style="list-style-type: none"> • Util para la evaluación de sistemas de relevo existentes y el diseño de sistemas nuevos. Identificando escenarios de relevo, calcula tamaños mínimos para tejas nuevas. • Reporta los resultados de la simulación tanto en tablas como a nivel del esquema dibujado de la red, permite importar datos desde otros simuladores de proceso tales como Aspen HYSYS y Aspen Plus. • Permite la personalización de los modelos con una considerable gama de opciones, tales como: Cálculo de transferencia de calor en las tuberías, curvas de caída de presión definidas por el usuario para tejas, múltiples métodos de cálculo de caída de presión y una extensa base de datos de tuberías. 	Aspen Tech®	http://www.aspentech.com/products/aspens-flarenet.aspx

2.6 Investigaciones relacionadas con el modelado y optimización de redes de transporte y distribución de gas

Existe gran número de investigaciones relacionadas con el modelado y optimización de redes gas. A continuación se nombran las más relevantes y se detallan los modelos desarrollados y los resultados obtenidos.

[Wong y Larson \(1968\)](#) reportaron el uso de estrategias de optimización dinámica con estructura tipo árbol para la planeación de actividades relacionadas con la operación de redes de transporte de gas, mostrando un bajo consumo de tiempo y capacidad computacional. Cabe señalar que esta investigación no estaba direccionada al desarrollo de un modelo para la minimización de consumo de potencia por compresión o costos de operación y capital de la red, sino que se trataba de la solución de un problema de control óptimo en el cual se tiene como objetivo establecer las mejores rutinas de arranque y manejo de las redes planteadas.

Por su parte [Suming \(1999\)](#) estableció como función objetivo el consumo de combustible en redes de transporte de gas natural, utilizando un modelo de optimización de tipo evolutivo. Tomó como variables de optimización la caída de presión, el número de estaciones de compresión y el flujo másico de gas. Para casos sencillos logró reducir el consumo de combustible entre 15 y 20 %. En casos más complejos no fue posible encontrar un óptimo para el problema planteado. No obstante si fue posible establecer los límites superiores e inferiores para las variables de optimización entre los que se podría encontrar el óptimo operacional.

En una investigación similar a la de [Suming \(1999\)](#), [Chebouba y colaboradores \(2008\)](#) plantearon una función objetivo de consumo de potencia de compresión en la cual las variables de optimización fueron el número de compresores de la red y la presión de descarga de cada uno de ellos. Para este caso se obtuvieron resultados satisfactorios utilizando la estrategia de optimización *Colonia de hormiga* en comparación con el uso de otras técnicas de optimización como el método del gradiente y la optimización dinámica (Métodos determinísticos), viéndose representada esta diferencia principalmente en una disminución en el consumo de tiempo computacional.

Ruan y colaboradores (2008) implementaron un modelo matemático para la optimización de redes de gas considerando todos los factores que influyen en la inversión para la construcción y operación del sistema (diámetro de la tubería, espesor de pared, presión de operación, longitud de tubería, relación de compresión, entre otros). Desde el punto de vista de las características del modelo, manejaba variables continuas y discretas por medio de una metodología de optimización por categorización. El programa de optimización desarrollado se aplicó a un proyecto práctico y se analizó el efecto del cambio en los parámetros del programa. El modelo mostró ser un método eficaz para la optimización de sistemas de redes de transporte de gas de alta presión.

El-Madhy y colaboradores (2010) plantearon una función objetivo de costos, que involucraba los costos de capital, operación y mantenimiento de la red. Implementaron un modelo hidráulico de *balance de nodos* y para la optimización desarrollaron un *Algoritmo evolutivo* estos dos modelos fueron acoplados para el desarrollo de un software llamado GAGAS. La herramienta desarrollada fue probada en topologías de red dadas y en el mejor de los casos arrojó óptimos con un valor de la función objetivo 12.1% menor que los obtenidos por ingenieros de proceso con una experiencia cercana a los 6 años, quienes se basaron en reglas heurísticas y criterios de diseño recomendados.

A nivel nacional, se han realizado investigaciones enfocadas a la obtención de herramientas computacionales para el dimensionamiento y optimización de redes de transporte de líquidos y gases. Camacho (1989) trabajó aspectos relacionados con el diseño, análisis y optimización de redes de distribución de agua comparando diferentes algoritmos de optimización. Inicialmente su trabajo estaba enfocado a la comparación del método de linealización de ecuaciones con los métodos de Hardy-Cross y Newton para la solución de sistemas de ecuaciones. Posteriormente utilizó el método de linealización para la implementación de un programa que realizaba el dimensionamiento y minimización de costos de redes tipo malla.

Narváez y colaboradores (1999) implementaron un modelo de balance de nodos solucionado por la técnica de linealización de ecuaciones para el modelamiento de redes de transporte y distribución de gas y sistemas de relevo a tea. El modelo desarrollado permitía predecir la presión en los nodos de la red y los flujos máxicos a través de los elementos de tubería e incluía el uso de válvulas de control y válvulas de seguridad, el cálculo de pérdidas por

accesorios por medio del modelo de las 2-K y no tenía en cuenta el uso de compresores en la red.

Narváez y Galeano (2004), basados en un modelo hidráulico similar al desarrollado en 1999 para gases, implementaron un algoritmo evolutivo para redes de distribución de líquidos tomando como función objetivo una función de costos de capital, operación y mantenimiento, y empleando como variables de optimización los diámetros de las tuberías. Los resultados obtenidos en comparación con investigaciones anteriores que utilizaban estrategias de optimización determinísticas, son similares y en algunos casos mejores, con la gran ventaja de que requieren un menor consumo de memoria computacional.

2.7 Problema de investigación y objetivos

Lo expuesto en los numerales anteriores ratifica la necesidad de realizar una investigación enfocada hacia la obtención de una herramienta computacional para el modelado y optimización de redes de transporte de gas, tomando como base lo elaborado hasta la presente por otros autores y cuyo resultado sea de utilidad para profesionales dedicados a la ingeniería de procesos.

El presente trabajo de investigación tiene los siguientes tres objetivos:

- Desarrollar un modelo hidráulico que permita predecir las presiones en los nodos y los flujos máxicos a través de los elementos de tubería en redes de transporte y distribución de gas en estado estacionario.
- Elaborar un modelo de optimización basado en una estrategia de tipo probabilístico que permita minimizar los costos asociados a la construcción, operación y mantenimiento de redes de transporte y distribución de gas, cumpliendo con criterios técnicos de diseño.
- Implementar una herramienta computacional basada en los modelos hidráulico y de optimización desarrollados, realice el dimensionamiento de gasoductos y redes de distribución de gas en estado estacionario y que a su vez permita la obtención de configuraciones de red que minimicen los costos asociados a la construcción, operación y mantenimiento de la red, cumpliendo con los requerimientos técnicos de diseño.

3. Modelo hidráulico para gasoductos y redes de distribución de gas

Este capítulo presenta el modelo hidráulico desarrollado para predecir las presiones en los nodos y los flujos a través de los elementos de tubería, válvulas y compresores en gasoductos y redes de distribución de gas en estado estable. El modelo incluye elementos de tubería, accesorios, válvulas de control, válvulas de seguridad, compresores centrífugos y reciprocantes.

El modelo se prueba en tres ejemplos de red, dos de ellos estudiados en la literatura y uno a nivel industrial. El primer ejemplo es una red de distribución sencilla propuesta por [Osciadacz \(1987\)](#) que consta únicamente de elementos de tubería y posteriormente estudiada por [Narváez y colaboradores \(1999\)](#). Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo se comparan con lo reportado por ambos autores. El segundo corresponde a una red de relevo a tea, propuesta inicialmente por [Kandell \(1981\)](#) y estudiada por [Narváez y colaboradores \(1999\)](#), que además de tuberías y accesorios, incluye válvulas de seguridad. Los resultados obtenidos con el modelo desarrollado se comparan con lo reportado por estos dos autores y adicionalmente con el resultado de la simulación en el software Aspen Flare System Analyzer®. El tercer ejemplo corresponde a un gasoducto que actualmente se encuentra en fase de construcción en la costa Caribe de Colombia. Los resultados del modelamiento de esta red de transporte, que tiene un compresor y extensos tramos de tubería, se comparan con lo reportado por la empresa de ingeniería que llevó a cabo la fase de ingeniería conceptual de este caso típico industrial.

3.1 Desarrollo del modelo hidráulico

El modelo hidráulico desarrollado en la presente investigación, permite realizar la simulación en estado estacionario y régimen isotérmico de redes de transporte y distribución de gas que puedan tener tuberías, accesorios, válvulas de control, válvulas de seguridad y compresores. Este se basa en el modelo de *balance de nodos* el cual se escoge debido a que el planteamiento de un balance de materia sencillo, que involucra los flujos de entrada y salida de cada nodo del sistema y una relación entre el flujo y la diferencia de presión en los elementos, permite modelar la red representando de manera sencilla y adecuada el fenómeno de flujo. Para la solución del sistema se emplea el método de *linealización de ecuaciones* ya que este simplifica los cálculos al no usar derivadas y utilizar una relación lineal entre la diferencia de presiones y el flujo.

A continuación se muestra paso a paso la obtención del modelo iniciando para cada uno de los elementos que puedan estar presentes en la red, tales como elementos de tubería, accesorios, válvulas de control, válvulas de seguridad y compresores.

3.1.1 Elementos de tubería

La Figura 3-1 muestra una sección de tubería con cierto grado de inclinación. Tomando como base este elemento de tubería se plantea la ecuación general de flujo.

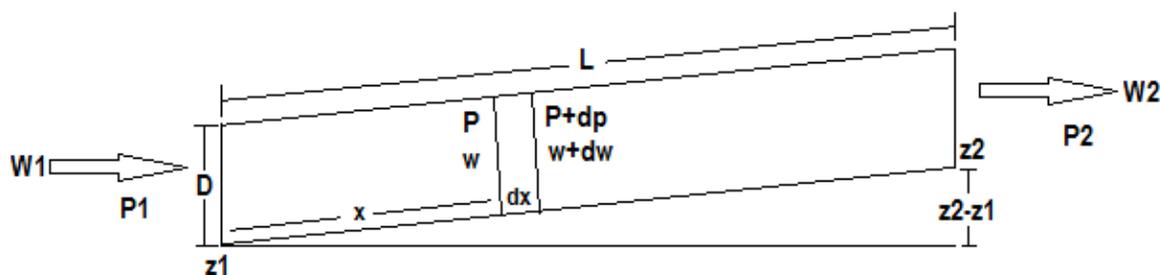


Figura 3-1. Sección de tubería para el planteamiento de la ecuación general de flujo.

Fuente: Adaptada de (Osciadacz A.J., 1987)

La ecuación general de flujo en estado estacionario para un gas en una tubería se obtiene de la expresión de Bernoulli. Teniendo en cuenta el cambio de altura a través del elemento diferencial de tubería que se muestra en la Figura 3-1 y despreciando el cambio

en la densidad dentro del elemento, la ecuación queda expresada como se muestra en la ecuación (3.1):

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = \frac{P+dP}{\rho g} + \frac{(v+dv)^2}{2g} + (z + dz) + dh_f \quad (3.1)$$

Las pérdidas por fricción se calculan por la expresión de Darcy como se muestra en la ecuación (3.2):

$$dh_f = \frac{f}{D} \frac{v^2}{2g} dx \quad (3.2)$$

Al considerar que los cambios en la energía cinética debidos a los cambios en la velocidad son despreciables, reemplazar la ecuación (3.2) en la ecuación (3.1) y realizar la simplificación de términos semejantes se obtiene la ecuación (3.3):

$$-\frac{dP}{\rho g} = dz + \frac{f}{D} \frac{v^2}{2g} dx \quad (3.3)$$

Multiplicando por ρg se tiene:

$$-dP = \rho g dz + \frac{f\rho}{2D} v^2 dx \quad (3.4)$$

Al plantear la ecuación de continuidad para la tubería se tiene la ecuación (3.5):

$$W_1 = W_2 \quad (3.5)$$

Tomando como referencia el punto de ingreso a la tubería, que corresponde al punto (1) se tiene:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho v A \quad (3.6)$$

Debido a que la sección transversal de la tubería es constante la ecuación (3.6) se transforma en:

$$v = \frac{\rho_1 v_1}{\rho} \quad (3.7)$$

Si en el elemento la temperatura permanece constante:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{ZRT}{MW} \quad (3.8)$$

Teniendo en cuenta que R , T y MW son constantes y considerando Z constante en el elemento de tubería, se obtiene la ecuación (3.9) al reemplazar los valores del punto (1) de la tubería en la ecuación (3.8):

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P}{\rho} \quad (3.9)$$

$$\rho = \frac{P}{P_1} \rho_1 \quad (3.10)$$

Reemplazando v de la ecuación (3.7) y ρ de a ecuación (3.10) en la ecuación (3.4):

$$-dP = \frac{P}{P_1} \rho_1 g dz + \frac{f P \rho_1}{2 D P_1} \left(\frac{\rho_1 v_1}{\rho} \right)^2 dx \quad (3.11)$$

Reacomodando:

$$-dP = \frac{P}{P_1} \rho_1 g dz + \frac{f P_1 \rho_1}{2 D P} v_1^2 dx \quad (3.12)$$

Multiplicando por P :

$$-P dP = \frac{P^2}{P_1} \rho_1 g dz + \frac{f P_1}{2 D} \rho_1 v_1^2 dx \quad (3.13)$$

Reemplazando $P_1 = \frac{\rho_1 Z R T}{M W}$ en la ecuación (3.13):

$$-P dP = \frac{P^2 M W}{Z R T} g dz + \frac{f}{2 D} \frac{\rho_1^2 Z R T}{M W} v_1^2 dx \quad (3.14)$$

Recordando la relación entre v y Q

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (3.15)$$

Reemplazando v en términos de Q :

$$-P dP = \frac{P^2 M W}{Z R T} g dz + \frac{f}{2 D} \frac{\rho_1^2 Z R T}{M W} \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2 dx \quad (3.16)$$

Considerando $P^2 = P_{av}^2$ y reemplazando en la ecuación (3.16) se obtiene la ecuación (3.17):

$$-P dP = \frac{P_{av}^2 M W}{Z R T} g dz + \frac{f}{D^5} \frac{\rho_1^2 Z R T}{M W} \left(\frac{8Q^2}{\pi^2} \right) dx \quad (3.17)$$

Reordenando:

$$-PdP = \frac{P_{av}^2 MW}{ZRT} g dz + \frac{8f}{\pi^2 D^5} \frac{ZRT}{MW} \rho^2 Q^2 dx \quad (3.18)$$

Integrando con respecto a P, z y x se obtiene la ecuación (3.19):

$$-\frac{1}{2}(P_2^2 - P_1^2) = \frac{gP_{av}^2 MW}{ZRT} (z_2 - z_1) + \frac{8f}{\pi^2 D^5} \frac{ZRTL}{MW} W^2 \quad (3.19)$$

Multiplicando por 2 a ambos lados de la igualdad:

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{2gP_{av}^2 MW}{ZRT} (z_2 - z_1) + \frac{16f}{\pi^2 D^5} \frac{ZRTL}{MW} W^2 \quad (3.20)$$

Aplicando la diferencia de presiones al cuadrado como la suma por la diferencia $P_1^2 - P_2^2 = (P_1 - P_2)(P_1 + P_2)$, se tiene:

$$P_1 - P_2 = \frac{2g\left(\frac{P_1+P_2}{2}\right)^2 MW}{(P_1+P_2)ZRT} (z_2 - z_1) + \frac{16f}{\pi^2 D^5} \frac{ZRTL}{MW} W^2 \frac{1}{(P_1+P_2)} \quad (3.21)$$

Simplificando y reordenando:

$$P_1 - P_2 = \frac{gP_{av} MW}{ZRT} (z_2 - z_1) + \frac{8f}{\pi^2 D^5} \frac{ZRTL}{MWP_{av}} W^2 \quad (3.22)$$

Reacomodando para acondicionar al modelo:

$$W^i = \frac{P_1 - P_2 + \{gP_{av} MW(z_1 - z_2)/(ZRT)\}}{\frac{8fZRTL|W|^{i-1}}{\pi^2 D^5 MWP_{av}^{i-1}}} \quad (3.23)$$

$$J = \frac{1}{\frac{8fZRTL|W|^{i-1}}{\pi^2 D^5 MWP_{av}^{i-1}}} \quad X = \frac{gP_{av}^{i-1} MW}{\frac{8fZ^2 R^2 T^2 L|W|^{i-1}}{\pi^2 D^5 MWP_{av}^{i-1}}} = \frac{gP_{av}^{i-1} MW}{ZRT} J$$

De manera que se cumple la siguiente expresión:

$$W^i = JP_1 - JP_2 + X(z_1 - z_2) \quad (3.24)$$

El superíndice i representa la i -ésima iteración mientras que el superíndice $i-1$ corresponde a la $i-1$ -ésima iteración.

La Tabla A1 del anexo A muestra las características de la tubería metálica utilizada a nivel industrial para la construcción de gasoductos y redes de distribución de gas. Estas características se utilizan en la implementación del software.

3.1.2 Accesorios

Para los accesorios tales como válvulas de corte, codos, té, cheques, entre otros, las pérdidas de presión se calculan por medio del método de las tres K. La ventaja que este tiene con respecto a los demás métodos mostrados en la Tabla 1-3, es que permite determinar de manera más acertada las pérdidas por fricción en accesorios para distintos regímenes de flujo y para todos los tamaños de accesorios disponibles en el mercado.

La Figura 3-2 representa un codo de 90°, un accesorio típico en las redes de tuberías. La deducción de la expresión lineal para el cálculo de pérdidas por accesorios se plantea con base en este accesorio pero puede aplicarse para cualquier tipo, variando únicamente el valor de las constantes del método de las tres-K. El punto (1) indica la entrada del flujo y el punto (2) la salida.

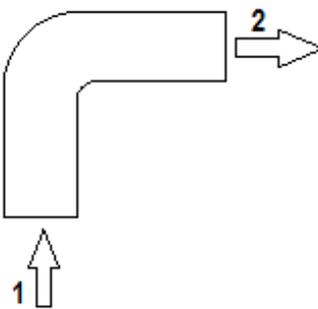


Figura 3-2. Representación de un accesorio para el planteamiento de las pérdidas por accesorios.

La caída de presión a través de un accesorio se representa por la ecuación (3.25):

$$(P_1 - P_2)_{acc} = K \frac{v^2}{2g} \rho g \quad (3.25)$$

El valor de K se calcula por medio de la ecuación (3.26):

$$K = \frac{K_1}{Re} + K_i \left(1 + \frac{K_d}{NPS^{0.3}(in)} \right) \quad (3.26)$$

La Tabla A7 del Anexo A muestra las constantes K_1 , K_i , y K_d del modelo de las tres K para el cálculo de la constante de pérdidas por accesorios.

Reemplazando las propiedades del gas a condiciones normales es la ecuación (3.25) se obtiene la ecuación (3.27):

$$(P_1 - P_2)_{acc} = \frac{K}{2} \left(\frac{\rho_n v_n}{\rho_{av}} \right)^2 \rho_{av} \quad (3.27)$$

Reemplazando v_n por $4Q_n/\pi D^2$ la ecuación (3.26) se convierte en la ecuación (3.27):

$$(P_1 - P_2)_{acc} = \frac{K}{2} \frac{\rho_n^2}{\rho_{av}^2} \left(\frac{4Q_n}{\pi D^2} \right)^2 \rho_{av} \quad (3.28)$$

Reordenando:

$$(P_1 - P_2)_{acc} = \frac{K}{2} \frac{16}{\pi^2 D^4 \rho_{av}} \rho_n^2 Q_n^2 \quad (3.29)$$

Reemplazando $\rho_n Q_n$ por W la ecuación (3.29) se convierte en la ecuación (3.30):

$$(P_1 - P_2)_{acc} = \frac{8K}{\pi^2 D^4 \rho_{av}} W^2 \quad (3.30)$$

Reemplazando $\rho_{av} = \frac{P_{av} MW}{ZRT}$ se tiene:

$$(P_i - P_j)_{acc} = \frac{8KZRT}{\pi^2 D^4 P_{av} MW} W^2 \quad (3.31)$$

Linealizando la ecuación (3.31) se obtiene la ecuación (3.32):

$$W^i = JP_i - JP_j \quad (3.32)$$

$$J = \frac{1}{\frac{8KZRT|W|^{i-1}}{\pi^2 P_{av} MWD^4}}$$

Acoplando el J del accesorio con el J para el elemento de tubería obtiene la ecuación (3.33):

$$J = \frac{1}{\frac{8ZRT|W|^{i-1}}{\pi^2 (ID)^4 MWP_{av}^{i-1}} \left(\frac{fL}{ID} + \sum K \right)} \quad (3.33)$$

Donde $\sum K$, es la suma de todos los K de los accesorios presentes en un elemento de tubería.

3.1.3 Válvulas de seguridad

Para las válvulas de seguridad (PSVs) se considera el dimensionamiento de este tipo de dispositivos en flujo subcrítico según el estándar API 520 Parte I (API, 2000).

La Figura 3-3 representa una válvula de seguridad, en donde el punto (1) es la entrada del flujo y el punto (2) la salida.

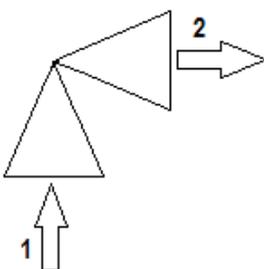


Figura 3-3. Representación de una PSV para el planteamiento de la ecuación lineal para el cálculo de caída de presión.

El flujo subcrítico en una PSV se presenta cuando $P_2 < P_c$ en donde P_c es la presión crítica y se calcula con la ecuación (3.34):

$$P_c = P_1 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/k-1} \quad (3.34)$$

Donde P_1 es conocida y se calcula como se muestra en la ecuación (3.35):

$$P_1 = P_{SET} * (1 + 0,16) + P_{ATM} \quad (3.35)$$

La ecuación (3.36) se utiliza para el dimensionamiento de PSVs en flujo subcrítico en unidades del sistema inglés:

$$W = \frac{CKA(in^2)\sqrt{P_1(PSIA)(P_1-P_2)PSI MW}}{\sqrt{T(^{\circ}R)Z}} \quad (3.36)$$

Aplicando factores de conversión a la ecuación (3.36) para llevarla a unidades del sistema internacional se obtiene la ecuación (3.37):

$$W = 2,1137 * 10^{-5} CKA \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P_2)MW}{TZ}} \quad (3.37)$$

La constante C se calcula utilizando la ecuación (3.38):

$$C = 520 \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1/k-1)}} \quad (3.38)$$

Adecuando al modelo lineal:

$$W^i = \frac{4,46787 * 10^{-10} C^2 K^2 A^2 P_1 MW}{TZ|W|^{i-1}} (P_1 - P_2) \quad (3.39)$$

$$J = \frac{4,46787 * 10^{-10} C^2 K_v^2 A^2 P_1^{k-1} MW}{TZ|W|^{i-1}} \quad (3.40)$$

$$W^i = JP_1 - JP_2 \quad (3.41)$$

La Tabla A4 del Anexo A muestra el área transversal de flujo de las válvulas de seguridad según el estándar API 520 Parte I, para todas se toma el valor de K_v igual a 0,975.

3.1.4 Válvulas de control

Para el caso en el que la red cuente con válvulas de control la Figura 3-4 representa el montaje típico para este tipo de dispositivos.

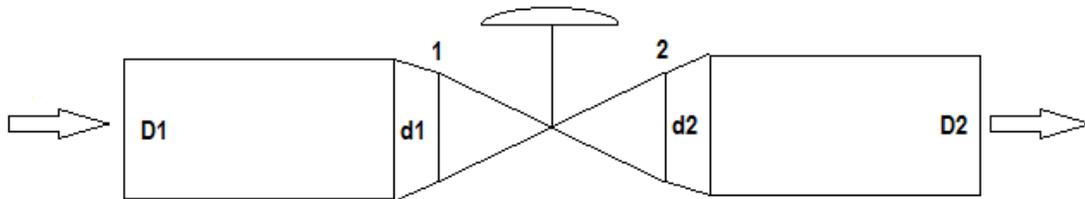


Figura 3-4. Representación de una válvula de control para el planteamiento de la ecuación lineal de cálculo de caída de presión.

La ecuación (3.42) representa la relación entre el flujo a través de la válvula y la diferencia de presión entre los puntos de entrada y salida (1 y 2) propuesta por Fisher (2013):

$$W = \left(984 * F_p * C_v * Y * \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P_2) * \frac{1 \text{ bar}}{100000 \text{ N/m}^2} * MW}{TZ}} \right) * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \quad (3.42)$$

En unidades del sistema internacional la ecuación (3.42) se convierte en:

$$W = \left(2,6333 * 10^{-7} * F_p * C_v * Y * \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P_2) * MW}{TZ}} \right) \quad (3.43)$$

El valor de Y se determina por medio de la ecuación (3.44)

$$Y = 1 - \frac{1,4 * (P_1 - P_2)}{3 * P_1 * k * X_T} \quad (3.44)$$

Donde X_T es un valor que suministra el fabricante de la válvula de control.

Los valores de F_p y $\sum K$ se calculan con las ecuaciones (3.45) a (3.49):

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum K}{21,4} C_v^2}} \quad (3.45)$$

$$\sum K = K_1 + K_2 + K_{B1} - K_{B2} \quad (3.46)$$

$$K_{B1} = 1 - \left(\frac{d_1}{D_1}\right)^4 \quad K_{B2} = 1 - \left(\frac{d_2}{D_2}\right)^4 \quad (3.47)$$

$$K_1 = 0,5 \left[1 - \left(\frac{d_1}{D_1}\right)^2 \right]^2 \quad (3.48)$$

$$K_2 = \left[1 - \left(\frac{d_2}{D_2}\right)^2 \right]^2 \quad (3.49)$$

Ajustando la ecuación (3.42) al modelo lineal se tiene:

$$W^i = \frac{6,9344 * 10^{-14} * F_p^2 * C_v^2 * Y^2 * P_1 * MW}{|W|^{i-1} * TZ} (P_1 - P_2) \quad (3.50)$$

$$J = \frac{6,9344 \cdot 10^{-14} F P^2 C_V^2 Y^2 P_1^{k-1} MW}{|W|^{i-1} Z T} \quad (3.51)$$

$$W^i = J P_1 - J P_2 \quad (3.52)$$

La Tabla A5 del anexo A muestra el C_v y el X_T de la lista de válvulas disponibles comercialmente. Esta lista conforma la base de datos de la herramienta de cálculo que se implementa en esta investigación.

3.1.5 Compresores

La Figura 3.5 representa el esquema de un compresor en el cual la presión a la succión (Punto 1) es menor que la presión en la descarga (Punto 2).

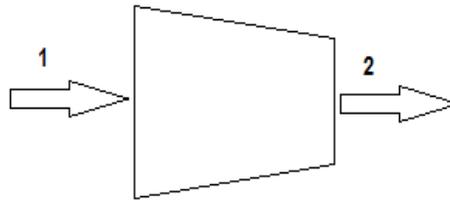


Figura 3-5. Representación de un compresor para el planteamiento de la ecuación lineal de cálculo de diferencia de presión.

a) Compresor centrífugo

La curva característica de un compresor centrífugo puede representarse adecuadamente empleando un polinomio de segundo orden y ser ajustada matemáticamente por una regresión del mismo orden. Previo a la regresión es necesario hacer un tratamiento a los datos de la curva de manera que permita manejarla en términos de la diferencia de presiones entre la succión y la descarga del compresor en función del flujo másico, para esto se debe tener en cuenta la densidad y el peso molecular del gas junto con la presión de succión considerada por el fabricante en los bancos de prueba del compresor para la elaboración de la curva. La ecuación (3.53) muestra la relación entre la diferencia de presiones a la descarga y succión del compresor con el flujo másico de gas:

$$P_2 - P_1 = AW^2 + BW + C \quad (3.53)$$

[Jeppson R. y colaboradores \(1975\)](#) propusieron un cambio de variable para la regresión cuadrática de la curva característica de bombas centrífugas que logra una convergencia

acelerada en el cálculo de los flujos de cada elemento de la red. Este cambio de variable fue probado por [Narváez P. y colaboradores \(1999\)](#) obteniéndose resultados satisfactorios. La ecuación (3.54) muestra el cambio propuesto en términos de los coeficientes de la regresión y el flujo másico de gas:

$$G = W + \frac{B}{2A} \quad (3.54)$$

En esta ecuación G es una variable homóloga al flujo másico que se crea para realizar el cambio propuesto. Al reemplazar la ecuación (3.54) en la (3.53) se obtiene la ecuación (3.55) que representa el comportamiento un compresor centrífugo y que garantiza la convergencia acelerada para el modelo de solución.

$$P_2 - P_1 = AG^2 + C^* \quad (3.55)$$

La constante C^* se calcula por medio de la ecuación (3.56):

$$C^* = C - \frac{B^2}{4A} \quad (3.56)$$

Linealizando la ecuación (3.55) se obtiene la ecuación (3.57) y despejando la variable G se obtiene la ecuación (3.58) que muestra la relación entre G y la diferencia de presión en el compresor:

$$P_2 - P_1 = AG^i |G^{i-1}| + C^* \quad (3.57)$$

$$G^i = \frac{P_2 - P_1 - C^*}{A|G|^{i-1}} \quad (3.58)$$

Una vez se calcula el valor de G en la ejecución del modelo, el valor del flujo másico se calcula despejando W de la ecuación (3.54). Ajustando al modelo en términos de J y X se tiene:

$$G^i = \frac{P_2 - P_1}{A|G^{k-1}|} - \frac{C^*}{A|G^{i-1}|} \quad (3.59)$$

$$G^i = JP_2 - JP_1 - X \quad (3.60)$$

$$J = \frac{1}{A|G^{i-1}|} \quad y \quad X = -\frac{C^*}{A|G^{i-1}|} \quad (3.61)$$

b) Compresor recíprocante

La curva característica de un compresor recíprocante se representa adecuadamente por medio de la función lineal. Para esta curva también es necesario hacer el tratamiento de los datos para obtener la diferencia de presión en términos del flujo másico de gas. La ecuación (3.62) muestra esta relación en términos de los coeficientes de regresión:

$$P_2 - P_1 = BW + C \quad (3.62)$$

Para el compresor recíprocante a diferencia del compresor centrífugo no es necesario hacer el cambio de variable para la aceleración de la convergencia. Despejando el flujo másico en la ecuación (3.62) se obtiene la ecuación (3.63) en términos de las constantes de regresión:

$$W^i = \frac{P_2 - P_1 - C}{B} \quad (3.63)$$

Otra diferencia del compresor recíprocante con respecto al centrífugo es que el valor del flujo másico para la iteración i no depende del flujo de la iteración $i - 1$. Esto se evidencia al comparar las ecuaciones (3.59) y (3.63).

Ajustando al modelo lineal se tiene:

$$W^i = \frac{P_2 - P_1}{B} - \frac{C}{B} \quad (3.64)$$

$$W^i = JP_2 - JP_1 - X \quad (3.65)$$

$$J = \frac{1}{B} \quad y \quad X = -\frac{C}{B} \quad (3.66)$$

Las columnas 3, 4 y 5 de la Tabla A6 muestran las constantes A, B y C para una lista de compresores disponibles a nivel comercial. Estas constantes se obtienen de hacer el tratamiento respectivo a los puntos de las curvas características suministradas por proveedores. Esta lista de compresores conforma la base de datos de la herramienta computacional que se implementa en la investigación. Cabe señalar que para los compresores recíprocantes el valor de la constante A es cero.

c) Incremento de temperatura por compresión y consideraciones de cálculo de diferencia de presión para equipos de proceso

La compresión del gas tanto para el compresor centrífugo como para el compresor recíprocante trae consigo un aumento en la temperatura de fluido. La ecuación (3.67) permite calcular la temperatura a la descarga del compresor Punto (2) tomando como base la temperatura a la succión Punto (1) y la relación de las presiones en unidades absolutas. El exponente al cual se eleva la relación de compresión involucra el coeficiente de compresión politrópica n , la ecuación (3.68) se usa para calcular $n - 1/n$ en términos de la relación de calores específicos k y la eficiencia politrópica η_p , el cual es un parámetro suministrado por el proveedor del equipo:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3.67)$$

$$\frac{n-1}{n} = \frac{k-1}{\eta_p k} \quad (3.68)$$

Recordando la condición de régimen isotérmico que se establece para el desarrollo del modelo hidráulico, vale la pena aclarar que el cálculo de temperatura a la descarga del compresor se realiza con el fin de tener un valor del incremento de temperatura que debe ser tenido en cuenta por el diseñador en la especificación del enfriador ubicado a la descarga. Para efectos del modelo se considera que el intercambiador disminuye la temperatura del gas hasta la temperatura inicial con un valor fijo de caída de presión que se define en el diseño del enfriador o por reglas heurísticas, y se introduce en el cálculo hidráulico como un valor constante h_e .

3.2 Método de solución

La presente investigación toma como método solución del modelo hidráulico la *Linealización de ecuaciones* presentado por primera vez por [Isaacs L. y colaboradores \(1980\)](#) para redes de distribución de líquidos y estudiado de manera preliminar por [Narváez P. \(1999\)](#) para redes de gas compuestas por tramos de tubería. Este trabajo extiende lo realizado para gases incluyendo en el modelo el cálculo de pérdidas menores por accesorios, la caída de presión debida a válvulas de seguridad, válvulas de control,

equipos de proceso y el aumento en la presión por la presencia de compresores centrífugos y reciprocantes. De aquí que las ecuaciones (3.24), (3.32), (3.41), (3.52), (3.60) y (3.65) sean el resultado de ajustar la relación entre el flujo másico y la diferencia de presión para elementos de tubería, accesorios, válvulas de seguridad, válvulas de control y compresores centrífugo y reciprocante respectivamente al método de linealización de ecuaciones.

Con base en lo anterior y el desarrollo del modelo del numeral 3.1, la ecuación general de flujo para elementos presente en redes de transporte y distribución de gas que puedan contener todos los elementos, equipos y dispositivos mencionados anteriormente se muestra en la ecuación (3.69):

$$\frac{gP_{av}MW}{ZRT}(z_2 - z_1) + AG^2 + C^* = \left[\frac{8ZRT}{\pi^2(ID)^4MWP_{av}} \left(\frac{fL}{ID} + \sum K \right) + \frac{TZ}{P_1MW} \left(\frac{1}{4.46787 \cdot 10^{-10} C^2 K^2 A^2} + \frac{ZT}{6.9344 \cdot 10^{-14} F_P^2 C_V^2 Y^2} \right) \right] W^2 + h_e \quad (3.69)$$

La ecuación (3.69) tiene en cuenta la presencia de un compresor centrífugo en la red, para ajustar la expresión para un compresor reciprocante de modificarse el término respectivo por el lado derecho de la ecuación (3.62).

Mediante la reorganización de términos la forma linealizada de la ecuación (3.69) se muestra en la ecuación (3.70):

$$W^i = \frac{\frac{gP_{av}MW}{ZRT}(z_2 - z_1) + A|G^{i-1}|G + C^* - h_e}{\left[\frac{8ZRT}{\pi^2(ID)^4MWP_{av}^{i-1}} \left(\frac{fL}{ID} + \sum K \right) + \frac{TZ}{P_1^{i-1}MW} \left(\frac{1}{4.46787 \cdot 10^{-10} C^2 K^2 A^2} + \frac{ZT}{6.9344 \cdot 10^{-14} F_P^2 C_V^2 Y^2} \right) \right]} |W|^{i-1} \quad (3.70)$$

El modelo de balance de nodos plantea y resuelve simultáneamente la ecuación de balance de masa para cada uno de los nodos de energía desconocida de la red, con lo cual se obtiene un sistema de n_2 ecuaciones con m incógnitas que corresponden a los flujos másicos por cada elemento (Narváez P., 1998). Conociendo los flujos externos o cargas (suministros a la red o entrega a usuarios) de manera que no se violen los grados de libertad del sistema, la expresión de continuidad se expresa como lo muestra el ecuación (3.71):

$$\sum_{j \in i} W_{ij} + L_i = 0 \quad (3.71)$$

Donde W_{ij} representa el flujo másico por el elemento entre los nodos i y j y L_i el flujo externo en el nodo i .

Al reemplazarse la ecuación (3.70) en el sistema que resulta de plantear el balance de nodos para la red, ecuación (3.71), se genera un sistema de ecuaciones lineales que puede resolverse por cualquiera de los métodos disponibles para tal fin. Para el presente trabajo teniendo en cuenta que la matriz cuadrada resultante siempre tiene valores diferentes de cero en la diagonal se elige el método de eliminación Gaussiana para la obtención de la matriz inversa que al multiplicarse por el término independiente da como resultado el vector solución, que para efectos del modelo representa las presiones en los nodos de presión desconocida.

No obstante el método de cálculo es un procedimiento iterativo debido a que los coeficientes de la matriz dependen a su vez del flujo másico, la presión promedio en los elementos de tubería y la presión en los nodos asociados a válvulas de seguridad y válvulas de control. Por tal razón se suponen valores de flujo másico de 1 kg/s y de presión promedio igual al promedio de las presiones en los nodos de presión conocida para la iteración inicial, una vez se resuelve el sistema de ecuaciones, los valores obtenidos sirven como entrada para la siguiente iteración.

Con el fin de mejorar la convergencia del método y disminuir el número de iteraciones necesarias para obtener la solución del problema, el flujo másico que se calcula en cada iteración se promedia de la siguiente forma:

$$W_{prom}^i = \frac{W^i + W^{i-1}}{2} \quad (3.72)$$

El procedimiento iterativo se realiza hasta alcanzar los criterios de parada que se muestran en las ecuaciones (3.73) y (3.74):

$$\left| \frac{W_{prom}^i - W^i}{W_{prom}^i} \right| \leq 2.5 \times 10^{-5} \quad (3.73)$$

El criterio de parada de la ecuación (3.73) fue probado por [Narváez P. \(1998\)](#) para líquidos en términos del caudal mostrando resultados satisfactorios al alcanzar convergencia en un número de iteraciones inferior a 10 para redes con tuberías,

accesorios, tanques y bombas. Para esta investigación se ajusta el criterio a gases manejando flujos máxicos.

Por otra parte el criterio de la ecuación (3.74) fue ajustado por [Narváez P. \(1999\)](#) para gases y probado en redes compuestas por elementos de tubería, accesorios y válvulas de seguridad. No obstante este no se utiliza para la implementación de la herramienta de la presente investigación.

$$\left| \frac{\sum p^k - p^{k-1}}{\sum p^k} \right| \leq 2.5 \times 10^{-5} \quad (3.74)$$

3.3 Ejemplos de aplicación del modelo

A continuación se muestran tres ejemplos de aplicación del modelo hidráulico desarrollado. El primero de ellos es una red de distribución sencilla propuesta por [Osciadacz \(1987\)](#) que consta únicamente de elementos de tubería, los resultados se comparan con lo obtenido por el mismo autor y por [Narváez y colaboradores \(1999\)](#). El segundo ejemplo corresponde a una red de relevo a tea que tiene además de tuberías y accesorios, válvulas de seguridad. Fue propuesta inicialmente por [Kandell \(1981\)](#) y estudiada por [Narváez y colaboradores \(1999\)](#), los resultados obtenidos con el modelo desarrollado se comparan con lo reportado por estos dos autores y adicionalmente con el resultado de la simulación en el software Aspen Flare System Analyzer®. El tercer ejemplo corresponde a un gasoducto que actualmente se encuentra en fase de construcción en la costa Caribe de Colombia, esta red de transporte tiene un compresor y extensos tramos de tubería de diámetro intermedio. Los resultados de la aplicación del modelo a este gasoducto se comparan con lo obtenido por una empresa de Ingeniería que realizó el diseño a nivel conceptual para este caso típico industrial.

3.3.1 Ejemplo 1. Red de Osciadacz

La Figura 3-6 muestra un esquema sencillo de red de distribución de gas planteado por Osciadacz en su libro “Simulation and Analysis of Gas Networks” en 1987, que posteriormente fue estudiada por Narváez y colaboradores en su investigación “Solución de Redes de Flujo para gases Usando el Modelo de Balance de Nodos y el Método de Linealización de Ecuaciones” en 1999.

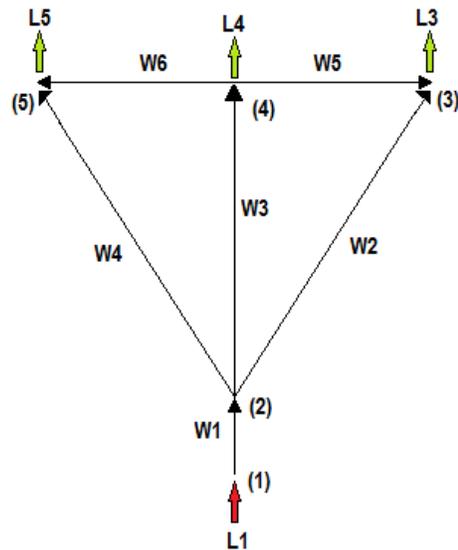


Figura 3-6. Red de Osciadacz

Fuente: Adaptada de (Osciadacz A.J., 1987).

La red consta de 6 elementos de tubería de diámetro, longitud y rugosidad conocidos, cuenta con cinco nodos, uno de recibo (ingreso), uno intermedio y tres de entrega (salida) de gas, el fluido que se transporta es aire a 300 K con un factor de compresibilidad igual a 0,945 y la una viscosidad dinámica $1,85 \times 10^{-5}$ kg/ms. El autor no reporta la presencia de accesorios en la red, por lo tanto el cálculo solo involucra la parte del modelo referente a elementos de tubería.

La Tabla 3-1 muestra las características de los elementos de tubería de la red y la tabla 3-2 información referente a los nodos.

Tabla 3-1. Características de los elementos de tubería de la red.

Elemento de tubería	Diámetro (in)	Longitud (m)	Rugosidad (m)
1	6	1	$1,50 \times 10^{-6}$
2	6	680	$1,50 \times 10^{-6}$
3	4	500	$1,50 \times 10^{-6}$
4	6	420	$1,50 \times 10^{-6}$
5	4	600	$1,50 \times 10^{-6}$
6	4	340	$1,50 \times 10^{-6}$

Tabla 3-2. Información de los nodos de la red.

Nodo	Flujo externo (kg/s)	Presión absoluta (Pa)	Altura (m)
1	Desconocido	104.325	10
2	0	Desconocida	10
3	$8,82 \times 10^{-2}$	Desconocida	5
4	$3,54 \times 10^{-2}$	Desconocida	5
5	$6,32 \times 10^{-2}$	Desconocida	5

Al aplicar el modelo de balance de nodos a la red de distribución se obtiene la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Balance de nodos para la red planteada.

<u>Elemento</u> Nodo	1	2	3	4	5	6	Término Independiente
2	$-W_1$	$+W_2$	$+W_3$	$+W_4$	0	0	0
3	0	$-W_2$	0	0	$-W_5$	0	$-L_3$
4	0	0	$-W_3$	0	$+W_5$	$+W_6$	$-L_4$
5	0	0	0	$-W_4$	0	$-W_6$	$-L_5$

Aplicando el modelo $W_1 = JP_2 - JP_1 + X(z_2 - z_1)$ a la información de la Tabla 3-3, se obtiene el sistema de ecuaciones lineales de la Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Sistema de ecuaciones lineales.

<u>Presión</u> Nodo	2	3	4	5	Término Independiente
2	$J_1 + J_2 + J_3 + J_4$	$-J_2$	$-J_3$	$-J_4$	$J_1 P_1 + X_1(z_1 - z_2) - X_2(z_2 - z_3) - X_3(z_2 - z_4) - X_4(z_2 - z_5)$
3	$-J_2$	$J_2 + J_5$	$-J_5$	0	$-L_3 + X_2(z_2 - z_3) + X_5(z_4 - z_3)$
4	$-J_3$	$-J_5$	$J_3 + J_5 + J_6$	$-J_6$	$-L_4 + X_3(z_2 - z_4) - X_5(z_4 - z_3) - X_6(z_4 - z_5)$
5	$-J_4$	0	$-J_6$	$J_4 + J_6$	$-L_5 + X_4(z_2 - z_5) + X_6(z_4 - z_5)$

Las Tabla 3-5 y 3-6 muestran los resultados obtenidos al aplicar el modelo de solución de redes desarrollado y la comparación con lo reportado por [Ozciadacz \(1987\)](#) y [Narváez y colaboradores \(1999\)](#).

Tabla 3-5. Flujos obtenidos con el modelo y los reportados por otros autores.

Elemento de tubería	Flujo (kg/s)		
	Osiadacz 1987	Narváez P. 1999	Modelo hidráulico desarrollado
1	No se incluye	0,188	0,187
2	0,082	0,078	0,078
3	0,030	0,028	0,028
4	0,079	0,080	0,080
5	0,016	0,010	0,010
6*	-0,012	-0,017	-0,017

*El signo negativo en el flujo del elemento de tubería N° 6 no va del nodo 4 al 5 como lo muestra la red de la Figura 3-6, sino en sentido contrario desde el nodo 5 hasta el nodo 4.

Tabla 3-6. Presiones obtenidas con el modelo y las reportadas por otros autores.

Nodo	Presión absoluta (Pa)		
	Osiadacz 1987	Narváez P. 1999	Modelo hidráulico desarrollado
1	No se incluye	104.325	104.325
2	104.325	104.314	104.315
3	103.974	103.037	103.046
4	103.884	103.222	103.219
5	103.805	103.504	103.496

Los resultados de las Tablas 3-5 y 3-6 muestran que el modelo hidráulico se desempeña de manera adecuada para redes sencillas compuestas únicamente por elementos de tubería, en comparación con lo reportado por otros autores, no obstante es necesario someter el modelo al cálculo de redes más complejas y comparar los resultados con lo obtenido usando software comercial. Por tal motivo en los ejemplos 2 y 3 se hace la comparación mencionada con herramientas comerciales.

3.3.2 Ejemplo 2. Red de relevo de Kandell

Kandell (1981) propuso la red de relevo que se muestra en la Figura 3-7, este sistema está compuesto por cuatro válvulas de seguridad (PSVs), cuatro líneas ramales que recogen el relevo de cada válvula, dos subcabezales que colectan cada uno de los

relevos de dos ramales y un cabezal principal que recoge las corrientes provenientes de los dos subcabezales y los direcciona hacia la tea. El autor propone un modelo que calcula las presiones en los nodos y flujos a través de los elementos de tubería sin tener en cuenta las presiones de ajuste de las PSVs ni su caída de presión. [Narváez y colaboradores \(1999\)](#) implementan un modelo que incluye las válvulas de seguridad y calcula las pérdidas en accesorios por métodos de las 2-K. Los resultados obtenidos usando el modelo hidráulico descrito en este capítulo se comparan con lo obtenido por [\(Kandell, 1981 y Narváez et al, 1999\)](#) y por el uso de software comercial de Aspen Flare System Analyzer® especializado en sistemas de relevo a tea.

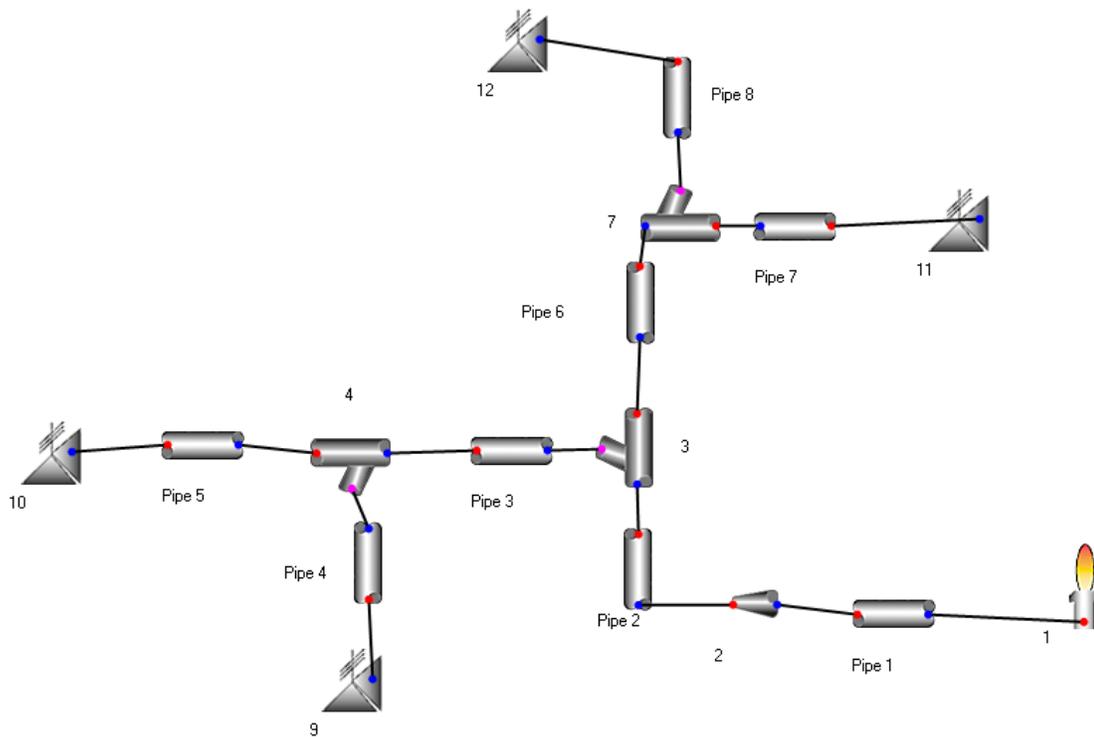


Figura 3-7.Red de relevo planteada por Kandell.

Fuente: [\(Kandell, 1981\)](#) representada en el software Aspen Flare System Analyzer®

Las Tablas 3-7 y 3-8 muestran las condiciones y propiedades del gas en los elementos de tubería y válvulas de seguridad respectivamente.

Tabla 3-7. Condiciones y propiedades del gas, y características de los elementos de tubería.

Elemento de tubería*	Diámetro interno (m)	Longitud(m)	Viscosidad (kg/m s)	Peso molecular del gas**	Temperatura (K)
1	0,7461	76,20	$1,08 \times 10^{-5}$	56,0	359,04
2	0,4414	304,80	$1,08 \times 10^{-5}$	56,0	359,04
3	0,3037	60,96	$1,18 \times 10^{-5}$	69,5	384,98
4	0,2027	30,48	$1,10 \times 10^{-5}$	80,0	355,37
5	0,2027	54,86	$1,30 \times 10^{-5}$	55,0	444,26
6	0,3037	35,05	$9,93 \times 10^{-6}$	46,4	331,82
7	0,1540	45,72	$9,81 \times 10^{-6}$	58,7	322,04
8	0,2545	91,44	$1,00 \times 10^{-5}$	44,7	338,71

* Todos los elementos de tubería tienen una rugosidad de $4,57 \times 10^{-5}$ m

** Se considera un factor de compresibilidad $Z = 0,90$.

Tabla 3-8. Condiciones y propiedades del gas, y características de las válvulas de seguridad.

Válvula de seguridad	Área transversal (m ²)	Código API de la Válvula de seguridad	Viscosidad (kg/m s)	Peso molecular del gas	Temperatura (K)
9	0,0018	L	$1,10 \times 10^{-5}$	80,0	355,37
10	0,0071	Q	$1,30 \times 10^{-5}$	55,0	444,26
11	0,0041	P	$9,81 \times 10^{-6}$	58,7	322,04
12	0,0023	M	$1,00 \times 10^{-5}$	44,7	338,71

La Tabla 3-9 muestra la cantidad y tipo de accesorios presentes en los elementos de la red y la Tabla 3-10 las constantes utilizadas para el cálculo de pérdidas por accesorios con el método de las 3-K.

Tabla 3-9. Cantidad y tipo de accesorios en los elementos de la red.

Elemento de tubería	Codo de 90°	Te (flujo recto)
2	5	1
3	1	1
6	3	1

Tabla 3-10. Constantes del método de 3-K para cálculo de pérdidas por accesorios.

Constante /Accesorio	Codo de 90°	Te (flujo recto)
K1	800	150
Ki	0,140	0,017
Kd	4,0	4,0

La Tabla 3-11 muestra las presiones conocidas de la red, la presión 1 corresponde a la presión en la base del stack de la tea y las presiones 10, 11, 12 y 13 a la presión de ajuste de las válvulas de seguridad.

Tabla 3-11. Presiones conocidas de la red.

Nodo	Presión (Pa)
1	101.325
10	2.451.789
11	692.732
12	935.360
13	2.274.642

Tomando como base la Figura 3-7 se plantea el balance de nodos para el sistema de relevo en términos de los coeficientes lineales (J) y las presiones conocidas, el balance se muestra en la Tabla 3-12.

Tabla 3-12. Balance nodal en términos de J y presiones conocidas.

Presión Nodo	2	3	4	5	6	7	8	9	Independiente
2	$-J_1-J_2$	J_2							$-J_1P_1$
3	J_2	$-J_2-J_3-J_6$				J_6			0
4		J_3	$-J_3-J_4-J_5$	J_4	J_5				0
5			J_4	$-J_4-J_9$					$-J_9P_{10}$
6			J_5		$-J_5-J_{10}$				$-J_{10}P_{11}$
7		J_6				$-J_6-J_7-J_8$	J_7	J_8	0
8						J_7	$-J_7-J_{11}$		$-J_{11}P_{12}$
9						J_8		$-J_8-J_{12}$	$-J_{12}P_{13}$

Se suponen valores iniciales de presión y ejecutando iteraciones sucesivas de la matriz hasta alcanzar el criterio de parada de la ecuación (3.69). Los resultados obtenidos de flujo másico y presión se comparan con lo reportado por [Kandell \(1981\)](#), [Narváez y colaboradores \(1999\)](#) y los resultados de la simulación con Aspen Flare System Analyzer® en las Tablas 3-13 y 3-14 respectivamente.

Tabla 3-13. Comparación de flujos máxicos obtenidos en los elementos de tubería.

Elemento de tubería	Flujo máxico (kg/s)			
	Solución de (Kandell, 1981)	Solución de (Narváez et al, 1999)	Solución de Aspen Flare System Analyzer®	Solución del modelo implementado
1	44,10	46,75	46,73	46,26
2	44,10	46,75	46,73	46,26
3	22,68	24,11	23,77	23,52
4	15,12	14,67	14,02	13,95
5	7,56	9,44	9,75	9,57
6	22,42	22,64	22,97	22,74
7	8,82	9,50	9,72	9,57
8	12,60	13,13	13,25	13,17
9	-	14,67	14,02	13,95
10	-	9,44	9,75	9,57
11	-	9,50	9,72	9,57
12	-	13,13	13,25	13,17

Tabla 3-14. Comparación de presiones obtenidas en los nodos de la red.

Nodo	Presión (Pa)			
	Solución de (Kandell, 1981)	Solución de (Narváez et al, 1999)	Solución de Aspen Flare System Analyzer®	Solución del modelo implementado
2	103.982	104.348	104.762	104.302
3	208.024	243.990	237.193	236.012
4	232.412	277.063	272.143	264.332
5	263.841	302.423	299.977	288.378
6	258.689	311.144	318.354	300.764
7	223.428	275.563	261.448	263.469
8	301.688	351.622	353.508	343.227
9	258.806	307.338	308.959	296.710

Con base en los resultados de las Tablas 3-13 y 3-14 se tiene que el modelo hidráulico obtiene resultados comparables con los obtenidos al usar software comercial especializado en sistemas de relevo. Adicionalmente es acorde con lo reportado por otros autores que han elaborado modelos de cálculo aplicados sobre la misma red.

3.3.3 Ejemplo 3. Gasoducto La Creciente, Tolú, Puerto Bahía

En finales de 2011 una empresa de Ingeniería y Construcción desarrolló la Ingeniería Conceptual para la construcción de un gasoducto en la costa caribe colombiana. Este caso típico industrial contempla el transporte de gas natural desde la estación La Creciente en donde se comprime por medio de un compresor reciprocante de una presión inicial de 1.200 psig y luego se despacha por una línea de 18 pulgadas de diámetro. 85 kilómetros aguas abajo de la descarga del compresor el gas llega a un punto de bifurcación en el cual 100 MMSCFD (22,73 kg/s) se envían a la estación costera de Tolú por una línea de diámetro de 12 pulgadas. Otros 100 MMSCFD (22,73 kg/s) se transportan desde la bifurcación hasta la estación de Puerto Bahía por una línea de 16 pulgadas de diámetro. Se utilizó para la simulación la herramienta Aspen Hysys Pipesys® desarrollada por Aspen Tech, para el cálculo de pérdidas por fricción en tuberías aplicó la ecuación de Darcy-Weisbach y para el cálculo del factor de compresibilidad del gas usó la ecuación de Peng-Robinson.

Las características del gas se reportan en la Tabla 3-15:

Tabla 3-15. Características del gas que se transporta el gasoducto.

Componente	Fracción molar
CO ₂	0,0009
Nitrógeno	0,0203
Metano	0,9735
Etano	0,0036
Propano	0,0007
i-Butano	0,0005
n-Butano	0,0003
i-Pentano	0,0002
Temperatura	80°F (300 K)
Presión	1.200 psig

La Figura 3-8 muestra el esquema del gasoducto descrito anteriormente y la Tabla 3-16 las características del compresor de la estación La Creciente correspondiente al elemento 1.

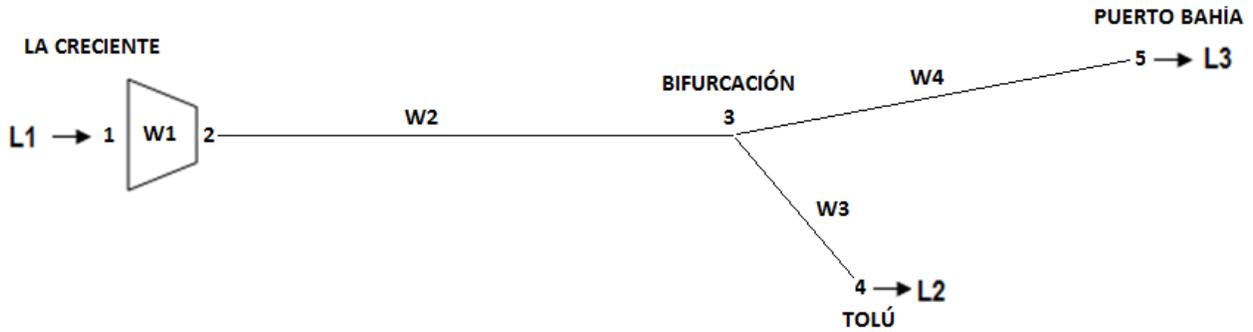


Figura 3-8. Esquema gasoducto La Creciente – Tolú – Puerto Bahía.

Tabla 3-16. Características del compresor que conforma el elemento 1.

Elemento	Tipo de compresor	Constante B	Constante C	Flujo mínimo (kg/s)	Flujo máximo (kg/s)
1	Reciprocante	-200.274,8	11.379.364,2	41.32	54.55

La Tabla 3-17 muestra las características de los elementos de tubería del gasoducto y las propiedades promedio del gas en estos elementos.

Tabla 3-17. Características de los elementos de tubería del gasoducto y propiedades promedio del gas en los elementos.

Elemento*	Diámetro nominal (in)	Schedule	Diámetro Interno (m)	Longitud (m)	Z _{promedio} **
2	18	Estándar	0,4287	85.000	0,834
3	12	Estándar	0,3032	6.000	0,845
4	16	Estándar	0,3366	110.000	0,848

* Todos los elementos de tubería tienen una rugosidad de $4,57 \times 10^{-4}$ m.

** Se considera una temperatura constante de 300 K (26,8 °C) a la cual la viscosidad del gas es de $1,13 \times 10^{-5}$ kg/ms y un peso molecular de 16,43 kg/kgmol.

La Tabla 3-18 muestra la información inicial que se tiene de las presiones y los flujos de suministro al gasoducto y flujos de entrega a usuarios finales en los cinco nodos existentes.

Tabla 3-18. Presión y flujos de suministro y entrega en los nodos del gasoducto.

Nodo	Presión absoluta (Pa)*	Flujo de suministro (kg/s)	Flujo de entrega a usuarios (kg/s)
1	8.372.753,6 (1.214,7 psia)	Desconocido	0
2	Desconocida	0	0
3	Desconocida	0	0
4	Desconocida	0	22,73
5	Desconocida	0	22,73

*El gasoducto se encuentra a nivel del mar por lo tanto la presión barométrica se toma igual a 101,325 Pa (14.7 psia).

Al realizar el balance de nodos para el gasoducto se obtiene la información que se muestra en la Tabla 3-19

Tabla 3-19. Balance nodal en términos de J y presiones conocidas.

Presión Nodo	2	3	4	5	Independiente*
2	$J_1 - J_2$	J_2	0	0	$-X_1 + J_1 P_1$
3	$-J_2$	$-J_2 - J_3 - J_4$	J_3	J_4	0
4	0	J_3	$-J_3$	0	L_2
5	0	J_4	0	$-J_4$	L_3

* Debido a que todo el gasoducto se encuentran a nivel del mar, el término de corrección por cambio de altura se hace cero y no se tiene en cuenta en el balance nodal.

Al aplicar el modelo hidráulico desarrollado en el numeral 3.1, luego de 21 iteraciones se obtienen los flujos que presenta la Tabla 3-20 los cuales son iguales a los obtenidos por la Ingeniería Conceptual del proyecto que se presentan en la misma tabla.

Tabla 3-20. Comparación de los flujos obtenidos por el modelo hidráulico desarrollado y lo obtenido en el caso industrial típico.

Elemento	Flujo másico (kg/s)	
	Caso industrial típico	Modelo hidráulico desarrollado
1	45,46	45,46
2	45,46	45,46
3	22,73	22,73
4	22,73	22,73

Las presiones obtenidas en los nodos se muestran en la columna 3 de Tabla 3-21 al compararse con las obtenidas por el caso industrial típico que se muestran en la columna 2 de la misma tabla, se observa que para los nodos 1 y 2 que corresponden a la succión y a la descarga del compresor de La Creciente las presiones son idénticas. Para los nodos 3, 4 y 5 localizados en la bifurcación, las barcazas de la estación Tolú y la estación de Puerto Bahía respectivamente, las presiones obtenidas con el modelo hidráulico son cercanas a las reportadas por la Ingeniería pero mayores.

Tabla 3-21. Comparación de las presiones obtenidas por el modelo hidráulico desarrollado y lo obtenido por el caso industrial típico.

Nodo	Presión absoluta (Pa)/(psia)		Diferencia (Pa)/(psia)	%Diferencia
	Caso industrial típico	Modelo hidráulico desarrollado	Con respecto al original	
1	8.372.754/(1.214,7)	8.372.754/(1.214,7)	0/(0)	0.00
2	10.647.396/(1.545)	10.647.857/(1.545)	461/(0)	0.00
3	8.779.432/(1.274)	7.942.593/(1.152)	836.839/(122)	10,53
4	8.324.504/(1.208)	7.877.800/(1.143)	446.704/(65)	5,37
5	7.890.254/(1.145)	6.338.325/(920)	1.551.929 /(225)	19,67

La diferencia en los valores de presión en los nodos 3, 4 y 5 entre el caso original y lo obtenido al aplicar el modelo, se debe a que las propiedades del gas principalmente el factor de compresibilidad, están ligadas a los cambios de presión que fluido sufre a medida que se desplaza por la tubería. Esta variación en las propiedades afecta en gran medida el cálculo de caída de presión, por tal razón se recomienda no usar valores promedio para un extenso tramo de tubería, sino calcularse punto a punto partiendo los tramos de tubería en elementos de menor longitud de manera que se disminuya el error en el cálculo.

El fenómeno descrito anteriormente se refleja en las tuberías de mayor longitud y diámetro menor, como es el caso de la tubería N°4 de 16 pulgadas de diámetro y longitud de 110 km la cual presenta una diferencia mayor entre el caso original y el resultado del modelo hidráulico en las presiones del nodo 5, mientras que en el elemento de tubería N° 2 de 18 pulgadas de diámetro y 85 km de longitud para la presión en el nodo 3 tienen un porcentaje de error menor entre el caso original y el caso modelado como se muestra en la Tabla 3-21.

Por otra parte, la herramienta Pipesys® utilizada por la ingeniería conceptual en el caso original para los cálculos hidráulicos cuenta con la opción de particionar la tubería, esto hace que la diferencia sea más marcada en los tramos de tubería largos. Por tal razón se opta por hacer la partición de las tuberías dos y cuatro, teniendo como premisa el no hacer el modelo más complejo sino por el contrario lograr una mejor aproximación a lo reportado para la red original de la manera más sencilla posible.

La Tabla 3-22 muestra los resultados obtenidos al partir el elemento de tubería dos en un tramo de 45.000 m y en otro de 40.000 m, y el elemento de tubería cuatro en un tubo de 60.000 m y otro de 50.000 m.

Tabla 3-22. Comparación de las presiones obtenidas por el modelo hidráulico desarrollado y lo obtenido por el caso industrial típico al hacer particiones.

Nodo	Presión absoluta (Pa)/(psia)		Diferencia (Pa)/(psia)	%Diferencia
	Caso industrial típico	Modelo hidráulico desarrollado	Con respecto al original	
1	8.372.754/(1.214,7)	8.372.754/(1.214,7)	0/(0)	0,00
2	10.647.396/(1.545)	10.647.857/(1.545)	461/(0)	0,00
3	8.779.432/(1.274)	8.671.177/(1.258)	128.355/(16)	1,26
4	8.324.504/(1.208)	8.624.026/(1.251)	299.522/(43)	3,60
5	7.890.254/(1.145)	7.666.783/(1.112)	223.471/(33)	2,90

Al comparar los resultados de las Tablas 3-21 y 3-22 se observa que hacer la partición de los elementos de tubería de mayor longitud disminuye la diferencia entre los valores de presión obtenidas por el modelo y el caso industrial original. Con base en esto se dice que el modelo desarrollado predice de manera aceptable los flujos en los elementos y presiones en los nodos de gasoductos, aun cuando alguno de esos elementos es un compresor.

Por otra parte, a lo largo del capítulo 3 se muestra en detalle cada una de las ecuaciones involucradas en el cálculo hidráulico, convirtiendo el modelo en una herramienta de caja blanca en comparación con las herramientas computacionales disponibles en el mercado que manejan una estructura de caja gris y negra, ya que no permiten al usuario verificar como se realiza internamente el cálculo.

4. Desarrollo del modelo de optimización

Este capítulo presenta el modelo de optimización desarrollado para la minimización del costo total anualizado de gasoductos y redes de distribución de gas en estado estable cumpliendo con las restricciones técnicas del problema. Este modelo se basa en un algoritmo evolutivo, herramienta adecuada para la optimización de problemas con variables continuas y discretas (Edgar T., 2001).

El modelo de optimización se acopla con el modelo de cálculo hidráulico desarrollado en el capítulo 3. Posteriormente se pruebaban las redes de Osciadacz (1987), la de relevo a tea propuesta por Kandell (1981) y el gasoducto La Creciente-Tolú-Puerto Bahía, especificados y evaluados hidráulicamente en el capítulo anterior en los numerales 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.3 respectivamente. Dado que no se dispone del costo total anualizado para ninguna de las dos redes de gas, el cálculo de la función objetivo para las configuraciones originales se realiza teniendo en cuenta la base de datos de costos de tuberías, accesorios y válvulas de seguridad del Anexo A. Adicionalmente previo a la ejecución del modelo acoplado se realiza una verificación de las restricciones del problema de optimización para las redes originales, obteniéndose de manera preliminar que la red de relevo a tea propuesta por Kandell no las cumple mientras que la red de Osciadacz y el gasoducto La Creciente-Tolú-Puerto Bahía si lo hacen. Una vez realizada la optimización para los dos casos se obtienen configuraciones de red que difieren considerablemente respecto de las originales y las diferencias se analizan para cada caso en específico.

4.1 Modelo de optimización

La estrategia de optimización desarrollada en la presente investigación se basa en un algoritmo evolutivo similar al implementado por Narváez P y Galeano H. (2004) para la minimización de costos de redes de distribución de líquidos a presión. Para su

funcionamiento es necesario acoplarlo con el modelo hidráulico descrito en el capítulo 3, ya con base en los cálculos hidráulico se verifica el cumplimiento de las restricciones y el costo total anualizado de la red. El modelo acoplado se prueba en dos de las redes estudiadas en el capítulo anterior y finalmente se toma para el desarrollo de la herramienta computacional.

A continuación se describe cada uno de atributos del modelo de optimización como lo son la función objetivo, las restricciones, la población, los operadores de selección, cruce y mutación, penalización de la función objetivo y el criterio de convergencia:

4.1.1 Función objetivo

En un problema de optimización, la función objetivo es la ecuación que expresa en términos matemáticos el objetivo de la optimización, esta agrupa todas las variables del sistema y es susceptible de ser minimizada o maximizada dadas las restricciones que se tengan (Narváez P. y Galeano H., 2004). Para el problema específico de redes de transporte y distribución de gas la función objetivo puede considerarse como la suma de costos de construcción y operación ó como el consumo total de potencia por compresión en la red (Peters M. S. y Timmerhaus K. D., 2003). Para efectos de la presente investigación la función objetivo corresponde a una función de costos que tiene en cuenta el costo anualizado de capital asociado a la compra e instalación de equipos y dispositivos (compresores, tubería, accesorios y válvulas) y el costo de operación y mantenimiento anualizado (consumo de potencia de compresión, y mantenimiento de tubería y otros elementos).

A continuación se describen los componentes de la función objetivo:

- Costo de capital del compresor

La ecuación (4.1) corresponde al costo de capital anualizado para el compresor j:

$$C_{AECj} = \frac{C_{ECj} - V_{sc}}{t_v} \quad (4.1)$$

C_{ECj} es el costo de capital del compresor, t_v es el tiempo de vida útil de la red y V_{sc} es el valor de salvamento del compresor. La ecuación (4.1) considera el método de

depreciación de lineal, de tal forma que considerando un valor de salvamento del 10% del C_{ECj} se obtiene la ecuación (4.2).

$$C_{AECj} = \frac{0,9C_{ECj}}{t_v} \quad (4.2)$$

La columna dos de la Tabla A6 del Anexo A muestra el costo de capital para la lista de compresores disponibles a nivel comercial. Estos compresores conforman la base de datos de la herramienta computacional que se implementa en esta investigación. Los costos fueron obtenidos con cotización directa con proveedores para el año 2013.

- Costo de tubería y accesorios

La expresión para el cálculo del costo de capital y mantenimiento de un elemento de tubería i que pueda estar presente en la red, para el caso específico en que se conoce en detalle la cantidad y tipo de accesorios (válvulas, codos, térs, cheques, etc) puede calcularse empleando la ecuación (4.3).

$$C_{ATii} = \frac{(1+F_I+K_f)(\sum C a_i + C_{Ti}L_{Ti})}{t_v} \quad (4.3)$$

Donde F_I es un factor que considera la instalación de la tubería y accesorios que varía entre 0,3 y 0,4. K_f es un factor que tiene en cuenta el costo operativo e incluye mantenimiento y varía entre 0,1 y 0,2. $\sum C a_i$ es la sumatoria de los costos de compra de los accesorios para el elemento de tubería i . C_{Ti} es el costo de compra de la tubería i por unidad de tubería y L_{Ti} es la longitud de la tubería i (Narváez P., 2004). Las Tablas A1, A2, A3, A4 y A5 del Anexo A muestran los costos de tubería, accesorios, válvulas de seguridad y válvulas de control que se utilizan para conformar la base de datos de la herramienta computacional. Cuando la información relativa a los accesorios y válvulas tales como cantidad, tipo o costo de compra no está disponible, la expresión para calcular el costo de capital y mantenimiento para el elemento de tubería i es la que se muestra en la ecuación (4.4):

$$C_{ATii} = \frac{(1+F+K_f)C_{Ti}L_{Ti}}{t_v} \quad (4.4)$$

Donde F es un factor que considera la instalación de la tubería y varía entre 0,4 y 0,5 (Narváez P., 2004).

- Costo de potencia de compresión

El costo anualizado de consumo de potencia por compresión para el compresor j es la que se muestra en la ecuación (4.5).

$$C_{APj} = \frac{0,0857 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot Q T_1 \cdot \frac{Z_1 + Z_2}{2} \cdot \frac{1}{\eta_{pj}} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \times t \times C_e}{1.000} \quad (4.5)$$

Donde C_e es el costo de la energía eléctrica en (USD/kWh), t es el tiempo de operación del compresor en horas por año, Z_1 y Z_2 son los factores de compresibilidad del gas a la succión y a la descarga del compresor respectivamente, Q es el flujo volumétrico del gas en MMSCFD, T_1 es la temperatura del gas en la succión del compresor y η_{pj} es la eficiencia politrópica.

La ecuación (4.6) corresponde al costo total anualizado de la red C_A , y agrupa las ecuaciones (4.2) a (4.5):

$$C_A = \sum_j (C_{APj} + C_{AECj}) + \sum_i C_{ATHi} \quad (4.6)$$

4.1.2 Restricciones del problema de optimización

Las restricciones en el problema de optimización permiten distinguir entre una configuración de red de tubería que cumple con los requerimientos técnicos de diseño y otra que no. Para el caso específico de redes de gas las restricciones son básicamente de dos tipos, el primer grupo considerado como restricciones *fuertes* que son básicamente tubería, accesorios, válvulas de seguridad, válvulas de control y compresores disponibles comercialmente. El segundo tipo lo conforman las restricciones *suaves* y entre ellas se encuentra el máximo producto ρv^2 , el número de Mach que aplica únicamente para sistemas de relevo a tea, la velocidad límite de erosión y la presión de formación de hidratos para el caso en que la red transporte gas de hidrocarburo.

En los literales a y b se describe cada una de las restricciones mencionadas:

a) Restricciones fuertes

Una restricción se considera *fuerte* cuando físicamente no es posible considerar una red de transporte o distribución de gas que opere sin cumplir con dicha restricción. Tanto el diámetro de las tuberías y accesorios como los tipos de válvulas de seguridad, válvulas de control y compresores que componen la red se consideran restricciones fuertes, ya que son variables discretas y por lo tanto sus características que se tienen en cuenta en el cálculo hidráulico dependen de lo que se encuentre disponible en el mercado. Las Tablas A1, A2, A3, A4, A5 y A6 del Anexo A, muestran los diámetros de tubería y accesorios, y las características de las válvulas de seguridad, válvulas de control y compresores disponibles comercialmente.

b) Restricciones suaves

Las restricciones *suaves* son aquellas que a pesar de no cumplirse hacen posible la construcción y operación de la red y, por lo tanto, es posible que el modelo de optimización genere configuraciones de red que no las cumplan pero sujetas a una penalización en la función objetivo, como se muestra en las ecuaciones (4.11) y (4.12). A continuación se muestran las restricciones *suaves* que se tienen en cuenta en la implementación de la herramienta computacional.

- Valor máximo del producto ρv^2

Para el dimensionamiento de las líneas de transporte de gas debe garantizarse que el producto ρv^2 sea menor o igual al criterio máximo especificado en la Tabla 4-1 según el intervalo de presión en el que opere la línea. Cuando no se respeta este límite máximo se presentan problemas asociados al ruido excesivo en la red.

Tabla 4-1. Criterio de valor máximo del producto ρv^2 para el dimensionamiento de líneas de gas.

Rango de presión (kPa)	ρv^2 (Pa) Máximo
$P \leq 2.000$	6.000
$2.000 < P \leq 5.000$	7.500
$5.000 < P \leq 8.000$	10.000
$P > 8.000$	15.000

Fuente: Adaptado de (API, 2007)

Esta restricción no aplica para sistemas de redes de recolección de relevos a tea. Para este tipo específico de redes la restricción es el número de Mach, condición que se describe a continuación.

- Número de Mach

El número de Mach es la relación que existe entre la velocidad del fluido y la velocidad del sonido en el medio físico en el que se transmite (Kayode C., 2007). Para el caso específico del modelo de optimización, el fluido es el gas que se transporta por la red y el medio físico es la atmósfera terrestre. En esta atmósfera la velocidad del sonido es 340 m/s. El número de Mach se calcula usando la ecuación (4.7):

$$Mach = \frac{v}{340} \quad (4.7)$$

En donde v corresponde a la velocidad del gas en el elemento de tubería expresada en m/s.

En el dimensionamiento de redes de relevo a tea debe cumplirse que el número de Mach sea menor a 0,7, con lo cual se garantiza que se maneja flujo subsónico según API 520 Parte I (API, 2000).

- Velocidad límite de erosión

La velocidad del gas en cualquier elemento de tubería de la red debe ser menor a la velocidad límite de erosión, debido a que a velocidades mayores o iguales a esta se presenta el problema de erosión. El fenómeno de erosión se presenta cuando el gas golpea con suficiente fuerza la pared de la tubería tal que desprende los productos de la corrosión de manera que el material de esta queda expuesto nuevamente para que inicie el proceso de corrosión (Narváez P., 2004).

La velocidad límite de erosión se calcula por medio de la ecuación (4.8) según el estándar API RP 14E (2007):

$$V_{LE} = \frac{0,3048 C_e}{\sqrt{0,06243 \rho_g}} \quad (4.8)$$

En donde ρ_g es la densidad del gas y el valor de C_e se escoge de la Tabla 4-2 según el servicio de la tubería.

Tabla 4-2. Valor de C_e para distintos servicios

Servicio	Caso	C_e
Continuo	Tubería con alta resistencia a la corrosión	150
	Corrosión uniforme con tasa menor a 0,3 mm/año	100
	Corrosión uniforme con tasa mayor a 0,3 mm/año	80
Intermitente	Todos los casos	200

Fuente: Adaptado de (API, 2007)

- Presión de formación de hidratos

Esta restricción aplica para gases derivados de hidrocarburo, los cuales bajo ciertas condiciones de temperatura y presión se combinan con las trazas de agua presentes para formar sólidos de color blanco llamados hidratos. La formación de estos sólidos son una condición indeseada en la líneas de transporte de gas, ya que taponan las tuberías trayendo consigo problemas operacionales que incrementan los costos de mantenimiento de la red (CGHR, 2013).

La ecuación (4.9) permite calcular la presión de formación de hidratos a la temperatura y gravedad específica del gas que se transporta en la línea. Para evitar la formación de hidratos debe garantizarse que la red opere en todos sus puntos por debajo de esta presión a la temperatura del fluido (GPSA, 2012).

Esta restricción también se tiene en cuenta para el modelo hidráulico descrito en el Capítulo 3, en el cual se identifica en el cálculo presiones y flujos, si en alguna parte de la red modelada se tienen condiciones operativas de presión y temperatura que se encuentren dentro de la región de formación de hidratos, si el usuario lo desea.

$$P(Pa) = 6.892,86 \times e^{\left[\frac{1,8 \times (T(K) - 273,15) + 48,5 + \frac{6,83}{SG^2}}{13,8} \right]} \quad (4.9)$$

4.1.3 Población

La cantidad de individuos que conforman la población del algoritmo evolutivo se fija como el número de variables de optimización multiplicado por un valor entero entre 20 y 40. Por ejemplo si se tienen ocho variables de optimización y se multiplica por veinte, el número de individuos que conforman la población es 160 (Martínez C., 2011 y Mateos A., 2012).

Por otra parte la generación inicial se crea de manera aleatoria a partir de la combinación de los elementos de tubería disponibles para el problema, para la obtención de la siguientes generaciones se aplican los operadores evolutivos como se menciona a continuación.

4.1.4 Operadores evolutivos

Como se mencionó en el capítulo 2 existen tres operadores sobre los que basa la operación un algoritmo evolutivo (selección, cruce y mutación). A continuación se describe el funcionamiento de los operadores que conforman la estrategia de optimización de la herramienta computacional desarrollada.

- Selección

El operador *selección* da la pauta de como escoger los individuos que sobrevivirán y sobre los cuales se basará el desarrollo de la siguiente generación. Existen varias formas de realizar la operación de *selección*, entre las que se destacan las siguientes: elitista, ruleta, torneo con ruleta, valor esperado, muestreo determinístico, estocástico sin reposición, estocástico con reposición y torneo binario, entre otros (Montesinos M., 1997). El operador de selección utilizado para el presente modelo es el *Elitista*, que consiste en ordenar de menor a mayor valor de la función objetivo los individuos que componen la población y cortar la población en el individuo que ocupe la posición del 50%. La siguiente generación se completa aplicando los operadores de cruce y mutación entre los individuos escogidos hasta alcanzar el 100% de la población.

- Mutación

Este operador introduce nueva información genética en la población con el propósito de explorar otras partes de la región factible y mantener la diversidad. Algunos de los operadores de mutación más conocidos son: "Simple uniforme" que consiste en variar

uno de los cromosomas del individuo, “simple no-uniforme” que es similar al anterior pero difiere en que el cromosoma que varía se escoge de manera aleatoria, por “intercambio” que consiste en cambiar de posición los cromosomas de un individuo entre sí y por “proximidad” que varía el cromosoma del individuo que orienta la mutación hacia la mejoría de la función objetivo (Narváez. P. y Galeano H., 2004). Para este modelo el operador de mutación seleccionado es el *Simple No Uniforme*, que consiste en cambiar aleatoriamente un cromosoma del genotipo de un individuo escogido también al azar. La cantidad de individuos mutados en la población corresponde a un valor entre 5 y 10% de la población total, y para que un individuo mutado entre a formar parte de la siguiente generación debe tener un valor de función objetivo tal que sea mejor a la del último sobreviviente que conformará la nueva generación.

La Figura 4-1 muestra el genotipo de un individuo de una población de configuraciones para una red compuestas por 6 elementos de tubería.

D1	D2	D3	D4	D5	D6
----	----	----	----	----	----

Figura 4-1. Genotipo de un individuo de 6 elementos de tubería.

Donde D_i representa el diámetro del elemento de tubería i .

Al aplicar el operador de mutación *Simple Uniforme* se selecciona al azar uno de los diámetros que compone el genoma del individuo y se reemplaza por otro diámetro disponible para la construcción de la red.

La Figura 4-2 representa el genotipo del individuo de la Figura 4-1 al que se le aplica el operador de mutación en el elemento de tubería 5 el cual se modificó D_5 por d_5 .

D1	D2	D3	D4	d5	D6
----	----	----	----	----	----

Figura 4-2. Genotipo del individuo mutado.

- Cruce

El cruce es la operación básica en un algoritmo evolutivo y consiste en la combinación de los atributos de dos o más individuos de la población para obtener un descendiente con las características de sus progenitores, el individuo obtenido producto del cruce tiene una alta probabilidad ser más atractivo para la optimización de lo que lo son sus padres. Algunos de los operadores más conocidos son: simple de un punto, simple de dos puntos, intercalado, uniforme, aritmético completo, aritmético simple, basado en la

posición y por ajuste parcial y ordenado por ajuste parcial (Narváez P. and Galeano H., 2004). Para el modelo que se implementa en la investigación el operador de cruce seleccionado es el *Simple de un punto*, que consiste en escoger un punto en la cadena de cromosomas, los primeros cromosomas hasta el punto seleccionado se toman del individuo 1 (individuo padre) y los restantes del individuo 2 (individuo madre).

La Figura 4-3 muestra el genotipo de dos individuos (padre y madre) de una población de configuraciones para una red compuestas por 6 elementos de tubería.

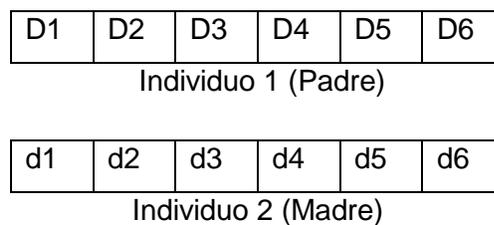


Figura 4-3. Individuos Padre y Madre.

Cuando se efectúa el operador de cruce *Simple de un punto* con los individuos de la Figura 4-3, se obtiene el progenitor se la Figura 4-4, en el cual desde la izquierda hasta el diámetro 3 se toma la información genética del Individuo 1 (Padre) y los diámetros restantes del genoma del individuo 2 (Madre). En este caso específico el punto sobre el cual se realizó se cruce fue el diámetro 3.

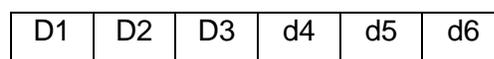


Figura 4-4. Primogénito resultante de aplicar el operador cruce.

El orden de aplicación de los operadores es el siguiente: Se crea la generación inicial y se aplica el operador de selección, se aplica el operador de mutación a los sobrevivientes de la primera generación y se completa la nueva generación con el operador de cruce.

- Penalización

Cuando las restricciones suaves que se establecen en la Tabla 4.1 y las ecuaciones (4.67), (4.8) y (4.9) no se cumplen al aplicar el modelo hidráulico a un individuo de la población, es necesario penalizar el valor función objetivo sin retirar el individuo de las soluciones factibles, pues a pesar de que el individuo no se ajusta completamente a las restricciones del sistema puede ser tenido en cuenta como parte de la población, ya que

al estar presente en la población se da la oportunidad de guiar la búsqueda en una región mayor en comparación con la que se tendría si se descartara (Martínez C., 2011).

El cambio que se realiza en la función objetivo consiste en un factor que multiplica las ecuaciones (4.3) y (4.4), este factor debe garantizar que el individuo pierda posiciones en el ordenamiento que se realiza en la selección y al mismo tiempo permanecer dentro de los individuos que conforman la población para guiar la búsqueda.

La expresión para el cálculo de la penalización se muestra en la ecuación (4.10):

$$\text{Expresión de penalización } i = \begin{cases} \text{Si } CV_i > R_i, & e^{\left[\frac{CV_i - R_i}{R_i}\right]} \\ \text{Si } CV_i \leq R_i, & 1 \end{cases} \quad (4.10)$$

Donde:

CV_i : Valor calculado de ρv^2 , v , número de Mach, presión de formación de hidratos según corresponda para el elemento i , y R_i : Es el valor de restricción para los parámetros ρv^2 , máxima velocidad erosional, número de Mach, presión de formación de hidratos, del elemento i .

Para los individuos en los que se debe aplicar la expresión de penalización las ecuaciones (4.3) y (4.4) se convierten en las ecuaciones (4.11) y (4.12) respectivamente:

$$C_{ATI} = \frac{(1+F_l+K_f)(\sum C a_i + C_{Ti} L_{Ti})}{n} \times \prod_{i=1}^4 \text{Expresión de penalización}_i \quad (4.11)$$

$$C_{ATI} = \frac{(1+F_l+K_f)C_{Ti} L_{Ti}}{n} \times \prod_{i=1}^4 \text{Expresión de penalización}_i \quad (4.12)$$

En donde:

$i = 1$ para la restricción ρv^2

$i = 2$ para la restricción máxima velocidad erosional

$i = 3$ para la restricción número de Mach

$i = 4$ para la restricción presión de formación de hidratos

4.1.5 Criterio de convergencia

El criterio de convergencia del modelo de optimización es cualquiera de los siguientes: El número de generaciones que se evalúan en la ejecución del algoritmo, el tiempo de cálculo, el cambio del mejor individuo entre generaciones sucesivas, y la diversidad de la población, que consiste en comparar el mejor y el peor individuo de una misma generación. El óptimo del problema es el individuo de mejor valor de función objetivo de la última generación evaluada (Narváez P. y Galeano H., 2004).

4.2 Ejemplo 1 de optimización – Red de Osciadacz

A continuación se muestra la aplicación del modelo de optimización en la red propuesta por Osciadacz (1987). Inicialmente se realiza una verificación de las restricciones del modelo para la configuración de red propuesta inicialmente por Osciadacz obteniéndose de manera preliminar que esta cumple con las restricciones. Posteriormente se establecen los atributos del algoritmo con el cual se realiza la optimización y finalmente se ejecuta el modelo acoplado (hidráulico y optimización) para este sistema de distribución de aire, obteniéndose una configuración de red que cumple con las restricciones del problema con un menor costo total anualizado que el evaluado para la red con los diámetros originales.

4.2.1 Verificación preliminar de las restricciones suaves

Inicialmente se hace una verificación de las restricciones suaves en la red original propuesta por el autor. Para efectos del ejemplo de la red propuesta por Osciadacz se establecen como restricciones del problema de optimización el producto de densidad del gas por velocidad al cuadrado y la velocidad límite erosional. La restricción del número de Mach no se tiene en cuenta debido a que este aplica para redes de relevo a tea y la restricción de presión de formación de hidratos tampoco se utiliza para el problema debido a que el gas que se distribuye en la red es aire y por tanto esta restricción que aplica para gases de origen hidrocarbúrico no tiene validez. La Figura 4-5 muestra la selección de las restricciones para la verificación inicial de la red. Para la restricción de velocidad límite de erosión se contempla un servicio continuo en la red y una tubería con alta resistencia a la corrosión.

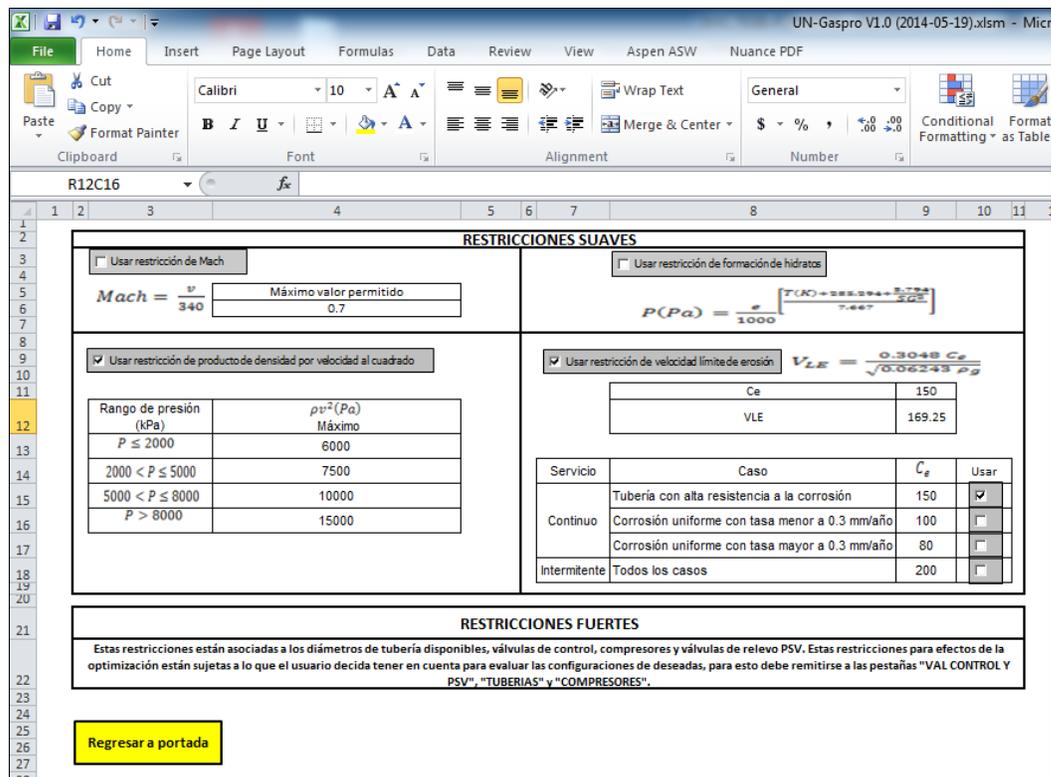


Figura 4-5. Selección de las restricciones suaves para la verificación preliminar.

Una vez se seleccionan las restricciones a tener en cuenta en la verificación, se realiza la evaluación hidráulica del sistema y la comparación con los límites de las restricciones, la evaluación hidráulica corresponde a los valores de flujo y presión que se muestran en las Tablas 3-5 y 3-6 del Capítulo 3. La Tabla 4-3 muestra la comparación entre los valores para la configuración inicial y los límites máximos permitidos.

Tabla 4-3. Valores de ρv^2 y V_{LE} para la configuración de red propuesta por Osciadacz (1987).

Elemento de tubería	Restricción (ρv^2) (Pa)		Restricción (V_{LE}) (m/s)	
	Máximo permitido	Configuración de red propuesta por Osciadacz (1987)	Máximo permitido	Configuración de red propuesta por Osciadacz (1987)
1	6.000	89,7	169,25	8,76
2	6.000	15,9	169,25	3,69
3	6.000	10,5	169,25	3,00
4	6.000	16,4	169,25	3,74
5	6.000	1,2	169,25	1,01
6	6.000	3,6	169,25	1,75

Al revisar la tabla anterior se evidencia que la red cumple ambos criterios para los seis elementos de tubería que la componen. Por lo tanto la penalización para esta configuración es cero (\$USD 0) y teniendo en cuenta las características de la red que se muestran en las Tablas 3-1 y 3-2 del Capítulo 3 el costo total anualizado para la red original es de \$USD 18.454.

4.2.2 Características del modelo de optimización

Para la optimización de la red de distribución de aire propuesta por Osciadacz se toman como variables de optimización los diámetros de los seis elementos de tuberías que conforman la red. La Figura 4-6 muestra el genotipo de un individuo cualquiera que se considera en la optimización, cabe resaltar que los diámetros de los accesorios asociados a los elementos de tubería cambian de diámetro en la medida en la que la tubería lo haga. Adicionalmente la función objetivo de costos tiene en cuenta los costos asociados a la tubería junto con sus accesorios.

D1	D2	D3	D4	D5	D6
----	----	----	----	----	----

Figura 4-6. Genotipo de un individuo cualquiera que se considera en el modelo de optimización.

Los diámetros de tubería que se utilizan para la conformación de los individuos en la optimización son 3, 4, 6 y 8 pulgadas para el Schedule 40 tanto en acero al carbón (C.S.) como en acero al carbón galvanizado (G.C.S.). Las características y costos de la tubería y accesorios con los que se realizan los cálculos hidráulicos y de la función objetivo se toman de las Tablas A1, A2, A3 y A7 del Anexo A.

El tiempo de vida de la red con el que se calcula el costo total anualizado de la función objetivo es 20 años, los valores de F_l y K_f son 0,35 y 0,15 respectivamente. El total de individuos que conforman la población es 120. Este número se obtiene de multiplicar el número de variables de optimización (6 diámetros) por 20 (multiplicador poblacional recomendado). Los operadores evolutivos de selección, mutación, cruce y penalización se aplican según lo descrito en el numeral 4.1.4. El criterio de convergencia se fija en la población número 50.

4.2.3 Resultado de la ejecución del modelo de optimización

El algoritmo de optimización descrito en el numeral 4.2.2. se ejecuta una vez obteniéndose la configuración de diámetros que muestra en Tabla 4-4. En la columna dos de la misma tabla se muestra la configuración de la red original propuesta por [Osciadacz \(1987\)](#).

Tabla 4-4. Diámetros de los elementos de tubería de la red original y el óptimo obtenido en la ejecución del algoritmo evolutivo.

Elemento de tubería	Diámetro (in) – Schedule-Material*	
	Configuración de red propuesta por Osciadacz (1987)	Óptimo obtenido
1	6 SCH 40 G.C.S.	3 SCH 40 C.S.
2	6 SCH 40 G.C.S.	3 SCH 40 C.S.
3	4 SCH 40 G.C.S.	3 SCH 40 C.S.
4	6 SCH 40 G.C.S.	3 SCH 40 C.S.
5	4 SCH 40 G.C.S.	3 SCH 40 C.S.
6	4 SCH 40 G.C.S.	3 SCH 40 C.S.

*C.S.: Acero al carbon (Carbon Steel), G.C.S.: Acero al carbón galvanizado (Galvanized Carbon Steel).

Al chequear la información de la Tabla 4-4 se evidencia que el óptimo alcanzado está conformado para los seis elementos de tubería, por el menor diámetro seleccionado para la optimización (3 pulgadas) y el material más económico de los dos disponibles (C.S.).

La Tabla 4-5 presenta la presión en los nodos para la red original y para el óptimo alcanzado por el modelo. Para el nodo 1 la presión es igual para las dos configuraciones, ya que en ambos casos esta es una variable definida para el problema.

La Tabla 4-6 muestra el flujo en los seis elementos de tubería para la red original y para el óptimo.

Tabla 4-5. Presiones en los nodos para la red original y para el óptimo obtenido.

Nodo	Presión (Pa)	
	Configuración de red propuesta por Osciadacz (1987)	Óptimo obtenido
1	104.325	104.325
2	104.315	104.062
3	103.046	83.608
4	103.219	88.513
5	103.496	88.562

Tabla 4-6. Flujos en los elementos para la red original y para el óptimo obtenido.

Elemento	Flujo másico (kg/s)	
	Configuración de red propuesta por Osciadacz (1987)	Óptimo obtenido
1	0,187	0,187
2	0,078	0,059
3	0,028	0,061
4	0,080	0,067
5	0,010	0,029
6	-0,017	-0,003

Al verificar las presiones para la configuración de la red óptima son menores que las de la red original en los nodos 2, 3, 4 y 5. Esto es de esperarse ya que al tener un menor diámetro la caída de presión en la red es mayor. Este aspecto también afecta los flujos másicos puesto que para todos los elementos, con excepción del 1, los flujos se cambiaron. Para algunos aumentó y para otros disminuyó. No obstante, tanto la red original como la red óptima cumplen con los flujos externos que se muestran en la Tabla 3-2 del Capítulo 3. Desde el punto de vista de diseño ingenieril es necesario revisar si

para la configuración óptima, la presión en los nodos de consumo (3, 4 y 5) es suficiente para los usuarios. De ser así la disminución de los diámetros a 3 pulgadas se puede aplicar de lo contrario es necesario conservar la configuración inicial. En cuanto a los criterios de ρv^2 y límite de velocidad erosional a pesar de que no se muestran para el óptimo estas restricciones se respetan por un amplio margen.

Con respecto al valor del costo total anualizado del óptimo alcanzado, la Tabla 4-7 muestra el valor de la penalización y el valor de la función objetivo con y sin penalización para la red original y para la red óptima. La investigación realizada por [Osciadacz \(1987\)](#) no reporta costos para esta red de distribución de aire, por tal razón para efectos del presente estudio la función objetivo para la red original se calcula con base en lo expuesto en el numeral 4.1.1. y los costos de capital de tuberías y accesorios del Anexo A.

Tabla 4-7. Valor de la penalización y de la función objetivo con y sin penalización en (\$USD/año) para la red original y el óptimo obtenido.

Descripción (\$USD/año)	Configuración de red propuesta por Osciadacz (1987)	Óptimo obtenido
Función objetivo sin penalización	18.454	5.336
Penalización	0	0
Función objetivo con penalización	18.454	5.336

Verificando la información de la Tabla 4-7 se evidencia que el costo total anualizado de la red se reduce en 71% al ejecutar el modelo acoplado de optimización.

Finalmente la Figura 4-7 muestra el comportamiento de la función objetivo del óptimo de cada generación durante cada una de las generaciones evaluadas en el modelo de optimización, como se observa en la gráfica el óptimo se alcanza en un número de generaciones cercano a 25 el cual es un valor mucho menor a 50 establecido como criterio de convergencia.

Para el ejemplo puntual de la red de distribución de aire de [Osciadacz](#), se tienen seis variables de optimización. Para redes más complejas con un número mayor de variables 50 generaciones pueden no ser suficientes para alcanzar la convergencia a un óptimo. Con respecto al tiempo de ejecución del algoritmo de optimización, utilizando un

computador con 4GB de memoria RAM y un procesador Intel Core i5™ de 2,80 GHz la rutina de cálculo tarda cerca de dos horas en alcanzar el óptimo en la población 25 y casi cuatro horas en llegar al criterio de convergencia de 50 poblaciones.

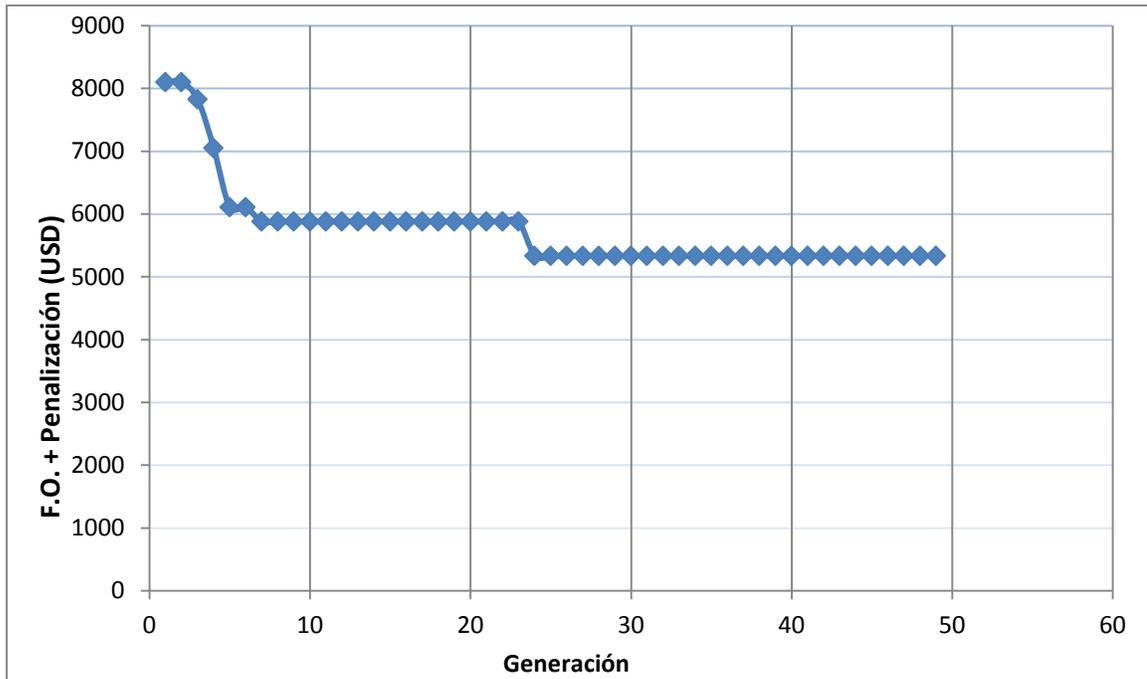


Figura 4-7. Variación de la función objetivo del mejor individuo en función del número de generaciones.

4.3 Ejemplo 2 de optimización – Red de Kandell

A continuación se muestra la aplicación del modelo de optimización en la red de relevo a tea propuesta por [Kandell \(1981\)](#). Inicialmente se realiza una verificación de las restricciones del modelo para la configuración de red propuesta, obteniéndose de manera preliminar que esta no cumple con las restricciones. Posteriormente se establecen las características del algoritmo con el cual se realiza la optimización y finalmente se ejecuta el modelo acoplado (hidráulico y optimización) para este sistema de relevo obteniéndose una configuración de red que cumple con las restricciones del problema al menor costo total anualizado posible.

4.3.1 Verificación preliminar de las restricciones suaves

Previo a la aplicación del modelo de optimización descrito en el numeral 4.1 se realiza la verificación del cumplimiento de las restricciones suaves en la configuración de red propuesta por [Kandell \(1981\)](#) que aparece en la Figura 3-7. Teniendo en cuenta las características del sistema que se muestran en las Tablas 3-7, 3-8, 3-9, 3-10 y 3-11, y los resultados de la aplicación del modelo hidráulico a la red que se reportan en las Tablas 3-13 y 3-14. Se obtiene que las restricciones de velocidad límite de erosión, presión de formación de hidratos y número de Mach se cumplen en los ocho elementos de tubería. No obstante la restricción de máximo ρv^2 solo se cumple para el elemento 1 y se sobrepasa para las demás tuberías por un amplio margen, como muestra la Tabla 4-8:

Tabla 4-8. Valores de ρv^2 para la configuración de red propuesta por [Kandell \(1981\)](#).

Elemento de tubería	Restricción (ρv^2)	
	Máximo permitido	Configuración de red propuesta por Kandell (1981)
1	6.000	5.542
2	6.000	27.706
3	6.000	17.926
4	6.000	17.254
5	6.000	13.010
6	6.000	18.535
7	6.000	25.258
8	6.000	12.690

4.3.2 Características del modelo de optimización

Para efectos de la optimización de la red de relevo se considera que los tamaños de las válvulas de seguridad presentes en el sistema son fijos y solo se toman como variables de optimización los diámetros de los ocho elementos de tuberías de la red. La Figura 4-8 muestra el genotipo de un individuo cualquiera. Cabe resaltar que los diámetros de los accesorios asociados a los elementos de tubería cambian en la medida en la que la tubería lo haga. Adicionalmente la función objetivo de costos tiene en cuenta los costos asociados a la tubería, accesorios y válvulas de seguridad.

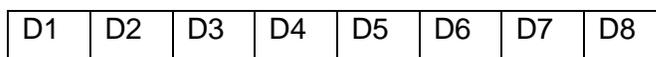


Figura 4-8. Genotipo de un individuo cualquiera que se considera en el modelo de optimización.

Los diámetros de tubería que se utilizan para la conformación de los individuos en la optimización son para el Schedule 40: 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 y 24 pulgadas y para Schedule XS: 26, 28, 30, 32, 34, 36 y 42 pulgadas. Las características y costos de la tubería, accesorios y válvulas de seguridad con las que se realizan los cálculos hidráulicos y la función objetivo se toman de las Tablas A1, A2, A3, A4 y A7 del Anexo A.

El tiempo de vida de la red con el que se calcula el costo total anualizado de la función objetivo es 20 años, los valores de F_l y K_f son 0,76 y 0,06 respectivamente. El total de individuos que conforman la población es 160, este número se obtiene de multiplicar el número de variables de optimización (8 diámetros) por 20. Los operadores evolutivos de selección, mutación, cruce y penalización se aplican según lo descrito en el numeral 4.1.4. El criterio de convergencia se fija en la población número 100.

4.3.3 Resultado de la ejecución del modelo de optimización

El algoritmo evolutivo de optimización descrito en el numeral 4.2.2. se ejecuta dos veces y en ambos casos se llega al mismo óptimo partiendo de poblaciones iniciales distintas, gracias a la naturaleza misma de la estrategia de optimización que garantiza que en cada ejecución que se realice se parta de una población inicial distinta a la demás.

La Tabla 4-9 muestra los diámetros de tubería de la configuración óptima obtenida con la ejecución del algoritmo evolutivo y lo compara con los diámetros de la red original propuesta por [Kandell \(1981\)](#).

Tabla 4-9. Diámetros de los elementos de tubería de la red original y el óptimo obtenido en la ejecución del algoritmo evolutivo.

Elemento de tubería	Diámetro (in)	
	Configuración de red propuesta por Kandell (1981)	Óptimo obtenido
1	30	32
2	18	30
3	12	24
4	8	16
5	8	16
6	12	24
7	6	14
8	10	16

Al verificar la información de la Tabla 4-9 a simple vista se evidencia que los diámetros son en todos los casos mayores para la configuración óptima en comparación con la red original, esto se debe a que con el diámetro mayor se garantiza que el producto ρv^2 sea menor y se pueda respetar la restricción, siendo esta la más crítica de las expuestas en el numeral 4.1.2.

La Tabla 4-10 presenta la presión en los nodos para la red original y para el óptimo alcanzado por el modelo. Para los nodos 1, 10, 11, 12 y 13 las presiones son iguales para las dos configuraciones de red ya que en ambos casos son variables definidas para el problema, pues la presión del nodo 1 es la presión de entrada a la tea y las presiones 10, 11, 12 y 13 que son las presiones al 100% de apertura de las válvulas de seguridad. Las presiones restantes se obtienen por medio del cálculo que realiza el modelo hidráulico y son menores para el óptimo en comparación con las de la red original, esto se explica gracias a que al tenerse mayores diámetros los elementos de tubería manejan un mayor flujo como lo muestra la Tabla 4-11 y por ende las pérdidas por fricción son mayores repercutiendo en un perfil de presiones con menor valor para la configuración óptima.

Tabla 4-10. Presiones en los nodos para la red original y para el óptimo obtenido.

Nodo	Presión (Pa)	
	Configuración de red propuesta por Kandell (1981)	Óptimo obtenido
1	101.325	101.325
2	104.302	104.122
3	236.012	124.056
4	264.334	127.415
5	288.375	129.776
6	300.764	131.803
7	263.469	127.654
8	343.227	132.281
9	296.710	137.126
10	2.451.789	2.451.789
11	692.732	692.732
12	935.360	935.360
13	2.274.642	2.274.642

Tabla 4-11. Flujos en los elementos para la red original y para el óptimo obtenido.

Elemento	Flujo másico (kg/s)	
	Configuración de red propuesta por Kandell (1981)	Óptimo obtenido
1	46,26	51,56
2	46,26	51,56
3	23,52	26,70
4	13,95	15,25
5	9,57	11,46
6	22,74	24,86
7	9,57	11,16
8	13,17	13,70
9	13,95	15,25
10	9,57	11,46
11	9,57	11,16
12	13,17	13,70

Al hacer una verificación de los flujos de los elementos de tubería que aparecen en la Tabla 4-11, la capacidad de manejo de flujos es mayor para la red optimizada en comparación con la red inicial. El flujo másico del elemento 1, que llega a la base de la tea, aumenta 5,30 kg/s de una configuración a otra. Los flujos 4, 5, 7, y 8 que son los de relevo de las válvulas de seguridad, también son mayores y adecuados para los tamaños de las mismas, pues vale la pena resaltar que los flujos cumplen en su totalidad la restricción fuerte de diámetros disponibles en el mercado y las restricciones suaves de velocidad límite de erosión, número de Mach y presión de formación de hidratos.

La Tabla 4-12 compara los valores de ρv^2 para la red original y la óptima con los establecidos como restricción de acuerdo a la presión de operación de cada elemento de tubería según el intervalo de presión operativa. Como se menciona en el numeral 4.2.1. la red original solo cumple esta restricción para la tubería 1 y la viola para los elementos

restantes. Para el sistema óptimo este valor se respeta para casi todas las tuberías siendo la excepción el elemento 2, no obstante la diferencia entre ρv^2 del óptimo y la restricción para la tubería 2 es baja afectando en una baja proporción la expresión de penalización para esta configuración.

Tabla 4-12. Valor del producto ρv^2 para la red original y para el óptimo obtenido en comparación con el máximo permitido.

Elemento de tubería	Restricción (ρv^2)		
	Valor máximo permitido	Configuración de red propuesta por Kandell (1981)	Óptimo obtenido
1	6.000	5.541	5.156
2	6.000	27.706	6.062
3	6.000	17.926	3.708
4	6.000	17.254	4.625
5	6.000	13.010	4.708
6	6.000	18.535	3.613
7	6.000	25.258	5.161
8	6.000	12.690	6.184

La forma de la ecuación (4.10) garantiza que sí no se respetan en su totalidad los valores de ρv^2 fijados por la restricción, los valores que se tengan en el óptimo sean levemente superiores. En ingeniería este concepto es muy importante ya que no siempre es posible que un diseño cumpla estrictamente los criterios de diseño establecidos. No obstante pequeñas desviaciones deben y pueden ser aceptadas sin comprometer la integridad del sistema en cuestión. Resulta interesante que el modelo, por su forma misma, permita generar información para hacer ese tipo de disertaciones con criterio ingenieril, favoreciendo siempre la obtención de soluciones que respeten las restricciones o si bien no es posible respetarlas en su totalidad por lo menos se esté lo más cerca posible a ellas.

La Tabla 4-13 muestra el valor de la función objetivo para la combinación óptima de diámetros y la red original con y sin penalización. La investigación realizada por [Kandell \(1981\)](#) no reporta costos para la red de relevo, por tal razón para efectos del presente trabajo la función objetivo para la red original se calcula con base en lo expuesto en el numeral 4.1.1. y los costos de capital de tuberías, accesorios y válvulas de seguridad del Anexo A.

Tabla 4-13. Valor de la función objetivo con y sin penalización para la red original y el óptimo obtenido.

Item (USD\$/año)	Configuración de red propuesta por Kandell (1981)	Óptimo obtenido
Función objetivo con penalización	316.973,3	10.088,4
Función objetivo sin penalización	7.647,3	10.006,6
Penalización	309.326,0	81,8

Se observa que sin penalización la red original es más económica que el óptimo alcanzado al ejecutar del modelo, esto se debe a que tiene diámetros menores y este hecho se asocia directamente a su costo total anualizado de la red. Pese a lo anterior la red original incumple por un amplio margen (2,20 a 4,60 veces el valor máximo) para siete tuberías de ocho existentes la restricción de ρv^2 , mientras que el óptimo cumple para siete de los ocho y la única que incumple lo hace por 0,01 veces su valor máximo (tubería 2).

Este hecho se ve reflejado en el valor de la función objetivo con penalización el cual es mucho menor para el óptimo que para la red original. Si el valor de penalización se asocia a costos de mantenimiento por un mayor desgaste en el material de la red o dicho en otras palabras una reducción en el tiempo de vida útil del sistema, resulta más económica la opción de construir la red con los diámetros del óptimo que con los de la red original.

Las Figuras 4-9 y 4-10 muestran el comportamiento de la función objetivo del óptimo de cada generación durante una de las dos pruebas realizadas al modelo de optimización, como se observa en las dos gráficas el óptimo se alcanza en un número de generaciones cercano a 40 el cual es un valor mucho menor a 100 establecido como criterio de convergencia.

Para el caso específico de la red de relevo de Kandell se manejan ocho variables de optimización. Para redes más complejas con un número mayor de variables 100 generaciones pueden no ser suficientes para alcanzar la convergencia a un óptimo. Por tal razón el estudio del efecto de modificar en el modelo el porcentaje de la población total que sufre mutación, las variables de optimización que mutan en el genotipo del individuo, el tipo de cruce entre individuos y la forma de hacer la selección de la población que sobrevive para formar la próxima generación puede ser tema en futuras investigaciones relacionados con la temática abordada. Y ver el efecto que estas características tienen sobre el valor del óptimo alcanzado y la rapidez con la que alcanza la convergencia.

Con respecto al tiempo de ejecución del algoritmo de optimización se tiene que, utilizando un computador con 8GB de memoria RAM y un procesador Intel Core i3™ de 1,80 GHZ, la rutina de cálculo tarda cerca de dos horas en alcanzar el óptimo en la población 40 y un poco más de tres horas en llegar al criterio de convergencia de 100 poblaciones. Mientras que en un computador de uso comercial en empresas dedicadas al diseño de procesos con memoria RAM de 4,0GB y procesador Intel Core i5™ de 2,80 GHZ el óptimo (población 40) se alcanza en treinta minutos y tarda cerca de una hora y media en llegar al criterio de convergencia de 100 poblaciones.

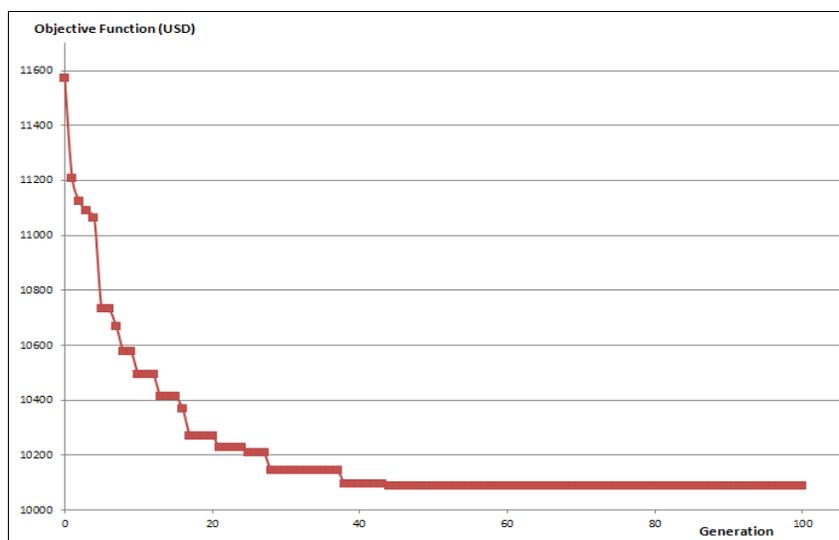


Figura 4-9. Variación de la función objetivo del mejor individuo en función del número de generaciones para la ejecución 1 del modelo acoplado de optimización.

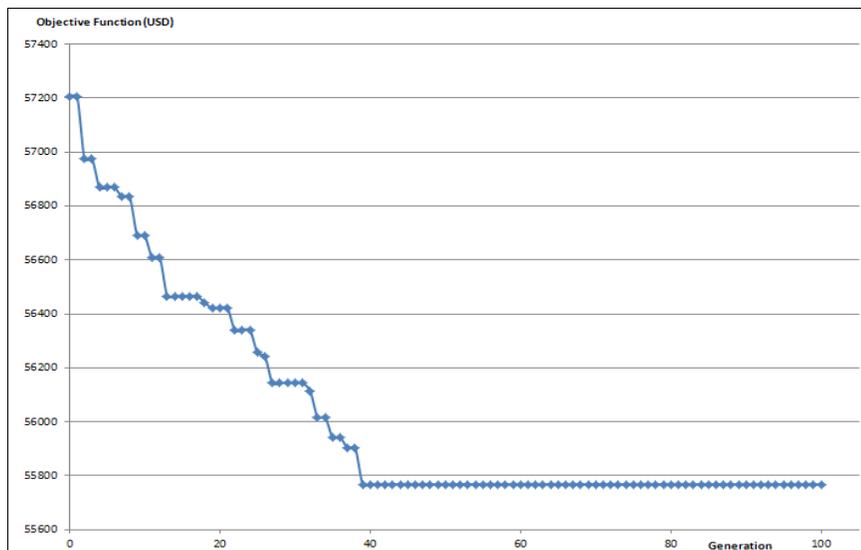


Figura 4-10. Variación de la función objetivo del mejor individuo en función del número de generaciones para la ejecución 2 del modelo acoplado de optimización.

Finalmente y teniendo en cuenta que uno de los objetivos principales de la investigación es desarrollar un modelo que sirva para la optimización del costo asociado a la construcción y operación de redes de transporte y distribución de gas, funcionando de manera eficiente respetando las restricciones fuertes y minimizando la diferencia para las suaves abarcando todo el espectro de combinaciones de red posibles. El modelo desarrollado es suficiente para implementarlo en la herramienta computacional y optimizar con base en una función de costos representativa de la red.

4.4 Ejemplo 3 de optimización Gasoducto La Creciente – Tolú-Puerto Bahía

A continuación se muestra la ejecución del modelo de optimización para el gasoducto La Creciente-Tolú-Puerto Bahía. Se inicia con la verificación de las restricciones del modelo para la configuración propuesta inicialmente, obteniéndose que esta configuración no viola ninguna de las restricciones. A continuación se establecen los atributos del algoritmo de optimización y finalmente se ejecuta el modelo para este sistema de transmisión de gas obteniéndose una configuración que cumple con las restricciones del problema con un menor costo total anualizado que el evaluado para el gasoducto original.

4.4.1 Verificación preliminar de las restricciones suaves

Para el ejemplo del gasoducto se establecen como restricciones del problema de optimización el producto de densidad del gas por velocidad al cuadrado, la velocidad límite erosional y la presión de formación de hidratos. La restricción del número de Mach no se tiene en cuenta debido a que este aplica para redes de relevo a tea. Para la restricción de velocidad límite de erosión se contempla un servicio continuo en la red y una tubería con alta resistencia a la corrosión.

Una vez se seleccionan las restricciones suaves para la verificación, se realiza la evaluación hidráulica del sistema y la comparación con los límites de las restricciones, la evaluación hidráulica corresponde a los valores de flujo y presión que se muestran en la tercera columna de las Tablas 3-20 y 3-21 del Capítulo 3. La Tabla 4-14 muestra la comparación entre los valores para la configuración inicial y los límites máximo permitidos.

Tabla 4-14. Valores de ρv^2 y V_{LE} , Presión de formación de hidratos para la configuración original del gasoducto.

Elemento de tubería	Restricción (ρv^2) (Pa)		Restricción (V_{LE}) (m/s)		Restricción Presión de formación de hidratos (Pa)/(psia)	
	Máximo permitido	Configuración original	Máximo permitido	Configuración original	Máximo permitido	Máxima presión en el elemento en configuración original
2	15.000	1.634	169,25	5,40	34.521.118 /(5.008)	10.647.396/(1.545)
3	15.000	2.065	169,25	6,64		8.779.432/(1.274)
4	10.000	409	169,25	2,95		8.779.432/(1.274)

Al revisar la tabla anterior se evidencia que el gasoducto cumple los tres criterios para los tres elementos de tubería que la componen. Por lo tanto la penalización para esta configuración es cero (\$USD 0) y teniendo en cuenta las características de la línea de transmisión que se muestran en las Tablas 3-18 y 3-19 del Capítulo 3 el costo total anualizado para la red original es de 5.009.616 \$USD/año. De este monto 2.067.136 \$USD/año (41,3%) corresponde al consumo de potencia por compresión, 1.155.980 \$USD/año (23,1%) al costo de capital del compresor y 1.786.500 \$USD/año (35,6%) al costo de capital, operación y mantenimiento de tubería.

4.4.2 Características del modelo de optimización

Para la optimización de la red de transmisión de gas natural se toman como variables de optimización el compresor y los diámetros de los tres elementos de tubería que conforman la red. La Figura 4-11 muestra el genotipo de un individuo cualquiera que se considera en la optimización, cabe resaltar que los diámetros de los accesorios asociados a los elementos de tubería cambian de diámetro en la medida en la que la tubería lo haga, no obstante para este caso en particular la red no considera la presencia de accesorios.

C1	D2	D3	D4
----	----	----	----

Figura 4-11. Genotipo de un individuo que se considera en el modelo de optimización.

Los diámetros de tubería que se utilizan para la conformación de los individuos en la optimización son los diámetros de 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24 pulgadas para los Schedules 40 y 60 en acero al carbono (C.S.), diámetros 12, 16 y 18 pulgadas para la tubería original del gasoducto correspondiente a Schedule STD en acero al carbono (C.S.), las características y costos de la tubería con los que se realizan los cálculos hidráulicos y de la función objetivo se toman de la Tabla A1 del Anexo A.. Para los compresores se utilizan para la optimización las curvas y costos de los compresores TBP1 y TBP2 de la Tabla A6 del Anexo A.

El tiempo de vida de la red con el que se calcula el costo total anualizado de la función objetivo es 20 años, los valores de F_t y K_f son 0,35 y 0,15 respectivamente. El total de individuos que conforman la población es 80, este número se obtiene de multiplicar el número de variables de optimización (1 compresor y 4 diámetros de tubería) por 20 (multiplicador poblacional recomendado). Los operadores evolutivos de selección, mutación, cruce y penalización se aplican según lo descrito en el numeral 4.1.4. El criterio de convergencia se fija en la población número 50.

4.4.3 Resultado de la ejecución del modelo de optimización

El algoritmo de optimización descrito en el numeral 4.2.2. se ejecuta una vez, obteniéndose la configuración de compresor y diámetros que se muestra en la Tabla 4-15 junto con la configuración del gasoducto original.

Tabla 4-15. Diámetros de los elementos de tubería del gasoducto original y el óptimo obtenido en la ejecución del algoritmo evolutivo.

Elemento	Diámetro (in) – Schedule-Material* y compresor	
	Configuración de gasoducto	Configuración de óptimo obtenido
1 (Compresor)	TBP 2	TBP 2
2 (Tubería)	18"-SCH STD-C.S.	16"-SCH STD-C.S.
3 (Tubería)	12"-SCH STD-C.S.	24"-SCH 60-C.S.
4 (Tubería)	18"-SCH STD-C.S.	16"-SCH STD-C.S.

*C.S.: Acero al carbón (Carbon Steel) y SCH: Schedule.

Chequeando la información de la Tabla 4.15 se evidencia que el óptimo alcanzado está conformado para los elementos de tubería del Schedule 60 y el compresor TBP2.

La Tabla 4-16 presenta la presión en los nodos para el gasoducto original y para el óptimo alcanzado por el modelo. Para el nodo 1 la presión es igual para las dos configuraciones de gasoducto ya que en ambos casos esta es una variable definida para el problema. La Tabla 4-17 muestra el flujo en los cuatro elementos de la red original y del óptimo.

Tabla 4-16. Presiones en los nodos de la red original y del óptimo obtenido.

Nodo	Presión (Pa)/(psia)	
	Configuración de red original	Configuración del óptimo obtenido
1	8.372.754 (1.504)	8.372.754 (1.504)
2	10.647.857 (1.545)	10.647.857 (1.545)
3	7.942.593 (1.152)	2.241.382 (325)
4	7.877.800 (1.143)	2.089.662 (303)
5	6.338.325 (920)	81.201 (118)

Tabla 4-17. Flujos en los elementos para la red original y para el óptimo obtenido.

Elemento	Flujo másico (kg/s)	
	Configuración de red original	Configuración del óptimo obtenido
1	45,46	45,46
2	45,46	45,46
3	22,73	22,73
4	22,73	22,73

Al verificar las presiones para la configuración óptima del gasoducto, se observa que son menores a las del original en los nodos 3, 4 y 5. Esto es de esperarse ya que al tener para la tubería 2 un diámetro menor (16") en comparación con el del gasoducto original (18"), la caída de presión a lo largo del recorrido de 85 km es mayor. Los flujos máxicos no se ven afectados puesto que los flujos de entrega a consumidor en los nodos 4 y 5 son un parámetro definido para el sistema, estos se muestran en la Tabla 3-18 del Capítulo 3. Desde el punto de vista de diseño ingenieril es necesario revisar si para la configuración óptima la presión en los nodos de consumo (4 y 5) es suficiente para los usuarios. De ser así la disminución de los diámetros con respecto a la configuración original se puede aplicar, de lo contrario es necesario conservar la configuración inicial debido a que esta garantiza las presiones establecidas inicialmente. Para el ejercicio realizado los que se mantuvieron constantes fueron los flujos máxicos. Este problema podría ser abordado desde otro punto de vista en el cual las presiones en los nodos 4 y 5 se conservan fijas permitiéndole al modelo variar el flujo por los elementos de tubería 3 y 4. Adicionalmente debe resaltarse que los valores de ρv^2 , límite de velocidad erosional y presión de formación de hidratos se respetan por un amplio margen para la configuración óptima del gasoducto a pesar de que no se muestran.

Con respecto al valor del costo total anualizado del óptimo alcanzado la Tabla 4-18 muestra el valor de la penalización y el valor de la función objetivo con y sin penalización para la red original y para la red óptima. La fuente bibliográfica no reporta valor de costo total anualizado para el gasoducto original, por tal razón para efectos del presente estudio el costo total anualizado se calcula con la función objetivo descrita en el numeral 4.1.1. y los costos de capital de tuberías, accesorios y compresores del Anexo A.

Tabla 4-18. Valor de la penalización y de la función objetivo con y sin penalización para el gasoducto original y el óptimo obtenido.

Item (\$USD/año)	Configuración de red original	Configuración del óptimo obtenido
Función objetivo sin penalización	5.009.616	4.198.469
Penalización	0	0
Función objetivo con penalización	5.009.616	4.198.469

Al evaluar la información de la Tabla 4-18 se evidencia que el costo total anualizado del gasoducto se reduce en 16,2 % al ejecutar el modelo acoplado de optimización. Al pasar de \$USD/año 5.009.616 a \$USD/año 4.198.169. Del valor de la función objetivo para el óptimo alcanzado el 49,2% (\$USD/año 2.067.136) corresponde al consumo de potencia por compresión, el 27,5% (\$USD/año 1.155.980) al costo de capital del compresor y 23,3% (\$USD/año 975.353) al costo de capital, operación y mantenimiento de tubería.

Un concepto introducido por [\(Peters y colaboradores, 2013\)](#) que cobra peso en este caso particular del gasoducto, es el de “diámetro óptimo”, ya que la red cuenta con un compresor cuyo consumo de potencia está ligado al diámetro de la tubería. En la medida en que el diámetro se hace de menor tamaño el consumo de potencia por compresión será mayor debido a que el gas tiene una mayor restricción al flujo, mientras que el aumento del diámetro tiene el efecto contrario, de aquí que surja una relación inversa entre el costo operacional de consumo de potencia y el costo de capital de la tubería. No obstante tanto en el gasoducto original como en la configuración obtenida de la optimización el costo asociado a la compresión y la compra del compresor es la misma, puesto que se manejan los mismos flujos y la misma curva característica del compresor. Lo que se evidencia en este caso es que la optimización se orientó hacia obtención de diámetros con menor costo cumpliendo las restricciones del problema. Redes más complejas con dos o más compresores podrían evidenciar concretamente el caso del diámetro óptimo permitiendo al diseñador probar la cantidad de compresores que considere relevante para los diámetros de tubería disponibles.

Finalmente la Figura 4-12 muestra el comportamiento de la función objetivo del óptimo de cada generación durante una de la prueba realizada al modelo de optimización, como se observa en la gráfica el óptimo se alcanza en un número de generaciones cercano a 23 el cual es un valor mucho menor a 50 establecido como criterio de convergencia.

Con respecto al tiempo de ejecución del algoritmo de optimización se tiene que utilizando un computador con 4GB de memoria RAM y un procesador de cuarta generación Intel Core i5™ de 2,80 GHz la rutina de cálculo tarda cerca de 5 horas en alcanzar el óptimo en la población 36 y casi 7 horas en llegar al criterio de convergencia de 50 poblaciones.

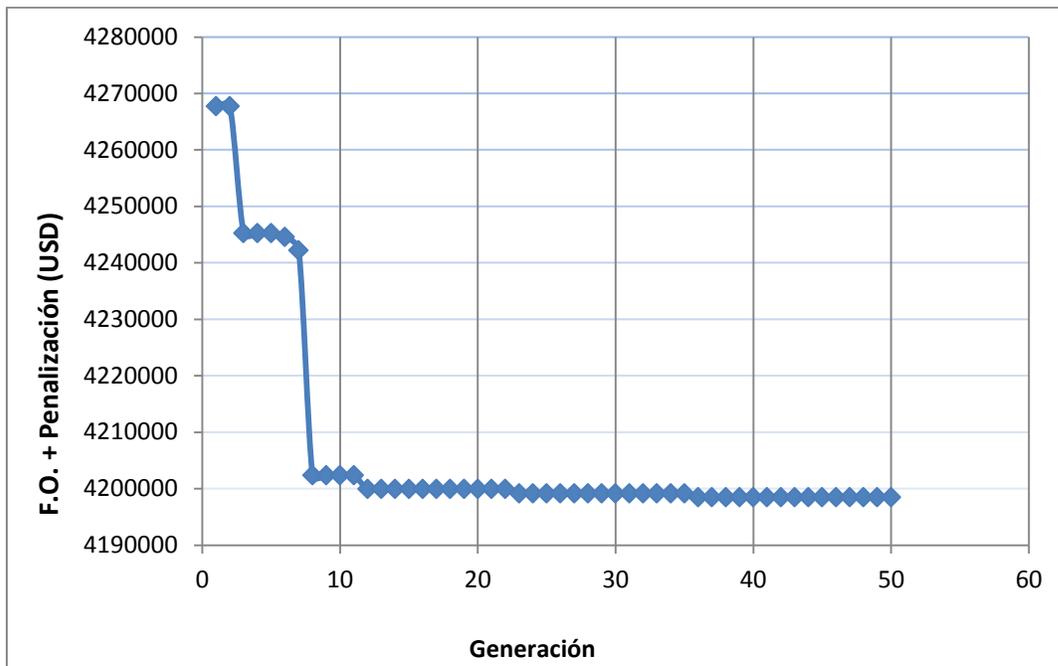


Figura 4-12. Variación de la función objetivo del mejor individuo en función del número de generaciones.

5. Implementación, descripción y uso de la herramienta computacional

En este capítulo se resumen los aspectos tenidos en cuenta para la implementación de la herramienta computacional entre los que se destacan: Selección del entorno de desarrollo, bases de datos con características técnicas y valores de costos de los elementos presentes en la red y los cálculos hidráulicos y de optimización que realiza la herramienta.

Posteriormente se dan las pautas básicas para el manejo de la herramienta por parte del usuario, describiendo la interfaz creada para la aplicación, la forma de ingreso de los datos de la red, manejo de bases de datos y el uso de los módulos de cálculo de propiedades del gas, cálculo hidráulico y optimización.

5.1 Selección del entorno de desarrollo del software

A nivel comercial existe gran cantidad de entornos para desarrollo de software para propósito general con énfasis en la programación visual. Estos entornos se encuentran empaquetados en programas de aplicación compuestos de un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica. Dentro de los lenguajes de programación más comunes se encuentran C++, PHP, Python, Java, C#, Delphi y Visual Basic. (Perry D.E., 1991).

Narváez P. (1998) reporta el uso del lenguaje Delphi para el desarrollo de un prototipo de software para el cálculo de redes de flujo de líquidos, obteniéndose una herramienta computacional que maneja una interfaz gráfica similar a la de software comercial como Aspen Flare System Analyzer de Aspen Tech® o Pipephase® con una alta eficiencia y versatilidad. No obstante la elaboración de este tipo de aplicación demanda la experticia

en el manejo del lenguaje de programación especializado lo cual se traduce en años de experiencia o la disponibilidad de presupuesto para pagar por el desarrollo deseado.

En vista que no se dispone de la experticia necesaria para el manejo de lenguajes de programación especializados se realiza la cotización con profesionales especializados en el desarrollo de software comercial y académico, del costo de la implementación de un prototipo de software similar al que se consigue en el mercado para el diseño de procesos industriales incluyendo redes de tubería. La Tabla 5.1 muestra el resultado de las cotizaciones realizadas:

Tabla 5-1. Cotizaciones realizadas para la implementación del software de dimensionamiento de redes de gas.

Opción	1	2	3
Lenguaje de programación	Delphi 7	Java	Visual Basic – Excel™
Tiempo de elaboración (meses)	1-2	2-3	1-3
Versatilidad	Alta	Media	Baja
Interfaz gráfica	Similar a software comercial	Similar a software comercial	Hoja de cálculo
Experticia de la persona que realiza la programación	Alta (5 ó más años)	Alta (3 ó más años)	Baja (1 año)
Costo (USD\$)	4.050*	2.530*	50**

*Incluye costo de la licencia de uso por un año y honorarios del programador.

**El costo corresponde únicamente al costo de la licencia para un computador de todo el paquete Microsoft Office™ 2013 por uso indefinido.

Con base en la Tabla 5-1 se opta por la opción 3 para la implementación de la herramienta puesto que es la más económica y se encuentra dentro de los tiempos manejados en la investigación para el desarrollo de la herramienta, no obstante de antemano se sabe de las limitaciones de que se tienen desde el punto de vista de versatilidad y de interfaz gráfica para el usuario. Para futuras investigaciones relacionadas con el presente trabajo, se propone profundizar en el desarrollo de la herramienta en alguno de los lenguajes mencionados en las opciones 1 y 2 o en otro similar con el fin de tener un prototipo con una versatilidad y una interfaz de la talla de la

del software comercial para el dimensionamiento de redes de transporte y distribución de gas.

5.2 Descripción y uso de la herramienta

La herramienta implementada se divide en cuatro componentes principales: Bases de datos de elementos que componen la red, cálculo de propiedades del gas, el módulo de cálculo hidráulico y el módulo de optimización. A continuación se describe cada uno de los componentes implementados en la herramienta en la hoja de cálculo de Excel™ con el Editor de Visual Basic™.

5.2.1 Bases de datos

La herramienta desarrollada cuenta con cuatro bases de datos que corresponden a tubería comercial, válvulas de control y de seguridad, compresores y accesorios, estas bases de datos contienen la información de las tablas del Anexo A. A continuación se describe como está compuesta cada una de ellas.

a) Tuberías

La base de datos de tubería incluida en la herramienta comprende tubería comercial con diámetros nominales que van desde ½", de uso principalmente en redes de distribución de gas domiciliario o redes en plantas químicas, hasta diámetros nominales de 42" utilizadas en líneas de transmisión como lo son los gasoductos.

La información se presenta en una tabla dentro de la pestaña "4.TUBERÍAS". La tabla contiene el diámetro interno y el costo en USD\$ por metro lineal para cada uno de los *schedules* disponibles que son 10, 20, 40, 60 y XS para acero al carbón y 40 para acero al carbón galvanizado. Adicionalmente, la base de datos permite la alimentación por parte del usuario información de tubería adicional que no se encuentre en la base de datos, de manera que pueda adaptarse el cálculo de un problema de diseño en particular según las necesidades del usuario. Para este caso, adicional al diámetro interno y el costo por metro lineal aparece una tercera casilla que permite introducir la rugosidad del material. Para la tubería existente en la base de datos, las rugosidades se tienen ligadas por defecto para los dos materiales utilizados.

b) Válvulas de control y de seguridad

Esta base de datos consta de dos tablas ubicadas en la pestaña “6. VAL CONTROL Y PSV”. La primera de ellas corresponde a las válvulas de control y la segunda a las válvulas de seguridad (PSVs).

La base de datos de válvulas de control comprende tamaños nominales que van desde ½” hasta 36”. La información allí consignada contiene el tipo de válvula (globo o mariposa), diámetro nominal, diámetro de entrada y diámetro de salida, costo en \$USD, y características de la válvula que influyen directamente en el cálculo hidráulico como lo son C_{vmax} , X_T y diámetro interno. Esta información se obtiene de cotizaciones y catálogos facilitados directamente por agentes comerciales en Colombia de las marcas Fisher, UOP y Keystone durante 2013.

En la base de datos de válvulas de seguridad se tiene información del diámetro interno, área transversal y costo en USD\$ para válvulas según clasificación API 526. La información que aquí se muestra corresponde a una adaptación de información suministrada por proveedores de la marca LESER®.

Como complemento a lo anterior, la base de datos puede ser alimentada por el usuario con información de hasta tres válvulas de control o siete válvulas de seguridad diferentes a las indexadas (Área de color verde). De esta manera es posible adaptar el cálculo a un problema en particular. En caso de requerirse un número mayor de válvulas personalizadas puede reemplazarse una de las existentes sin ningún de afectación al funcionamiento de la herramienta. No obstante debe verificarse que la información ingresada sea coherente y acorde con lo citado en el encabezado de cada columna.

La Figura 5-2 muestra la imagen de la base de datos de válvulas de control y de seguridad de la herramienta.

Válvula N°	REFERENCIA	TIPO	DIAMETRO NOMINAL	COSTO (USDS)	Cmax	XT	d1	d2	ID (m)	Optimización	PSV tipo	ID (in)	Cost(USDS)	Área (m ²)	Área (in ²)	Optimización
1	Fisher Easy-ES	GLOBO	1/2	3800	6.53	0.622	0.5	0.5	0.0333	Usar	D	0.3742	31.4	0.000071	0.110	Usar
2	Fisher Easy-ES	GLOBO	3/4	4150	14.2	0.534	0.75	0.75	0.0333	Usar	E	0.4996	38.3	0.000126	0.196	Usar
3	HPA CLASE 1500	GLOBO	1	4200	19.5	0.542	1	1	0.0333	Usar	F	0.6252	45.2	0.000198	0.307	Usar
4	Fisher Easy-ED	GLOBO	1 1/4	4500	22.1	0.556	1.25	1.25	0.0333	Usar	G	0.8003	58.5	0.000325	0.503	Usar
5	Fisher Easy-ED	GLOBO	1 1/2	4700	44.0	0.597	1.5	1.5	0.0476	Usar	H	0.9597	71.5	0.000506	0.785	Usar
6	Fisher Easy-ED	GLOBO	2	6500	77.6	0.623	2	2	0.0587	Usar	J	1.2801	90.6	0.000830	1.287	Usar
7	Fisher Easy-ED	GLOBO	2 1/2	6700	109.0	0.652	2.5	2.5	0.0730	Usar	K	1.5298	103.0	0.001186	1.838	Usar
8	Fisher Easy-ED	GLOBO	3	6900	161.0	0.577	3	3	0.0873	Usar	L	1.9059	184.7	0.001841	2.853	Usar
9	Fisher Easy-ED	GLOBO	4	8500	251.0	0.694	4	4	0.1111	Usar	M	2.1409	213.7	0.002323	3.600	Usar
10	Fisher Easy-ED	GLOBO	6	13400	460.0	0.710	6	6	0.1778	Usar	N	2.3507	288.1	0.002800	4.340	Usar
11	Fisher Easy-ED	GLOBO	8	22900	863.0	0.827	8	8	0.2032	Usar	P	2.8501	330.7	0.004116	6.380	Usar
12	933642-120-20-A1	GLOBO	10	33000	1210	0.700	10	10	0.2572	Usar	Q	3.7509	539.5	0.007129	11.050	Usar
13	933642-120-53-A1	MARIPOSA	14	34500	1720	0.700	14	14	0.3500	Usar	R	4.5135	628.8	0.010323	16.000	Usar
14	Fisher Easy-ED	MARIPOSA	16	44000	2020	0.671	16	10	0.3372	Usar	T	5.7545	790.2	0.016779	26.008	Usar
15	933642-120-13-A1	MARIPOSA	18	54000	10000	0.700	18	18	0.4500	Usar	User 1					Usar
16	933642-120-14-A1	MARIPOSA	20	76200	20000	0.700	20	20	0.5000	Usar	User 2					Usar
17	Keystone 106	MARIPOSA	24	164400	30000	0.700	24	24	0.6000	Usar	User 3					Usar
18	Keystone 106	MARIPOSA	30	200000	47000	0.700	30	30	0.7500	Usar	User 4					Usar
19	Keystone 106	MARIPOSA	36	250000	70000	0.700	36	36	0.9000	Usar	User 5					Usar
20	User 1									Usar	User 6					Usar
21	User 2									Usar	User 7					Usar
22	User 3									Usar	User 8					Usar

Figura 5-2. Base de datos de válvulas de control y válvulas de seguridad de la herramienta desarrollada.

Al costado derecho de cada una de las tablas de esta pestaña como se observa en la Figura 5-2 aparece una columna con el encabezado “Optimizar”, en esta columna es en la que el usuario puede seleccionar que válvulas debe considerar la herramienta para la optimización de la red.

c) Compresores

Para la información de los compresores se tiene una tabla en la pestaña “5.COMPRESORES”, que contiene los datos de costo de compra en \$USD, las constantes A, B y C de la curva característica del compresor utilizadas por la herramienta para el cálculo hidráulico y los flujos operativos mínimo y máximo permitidos para el compresor. La información que aquí se muestra corresponde a una adaptación de catálogos suministrados por agentes comerciales en Colombia de las marcas Siemens, Turbo, Ametek y Cameron, durante 2013.

Esta base de datos cuenta con información de cincuenta y seis compresores, cincuenta y tres de ellos tipo centrífugo y los tres restantes de tipo reciprocante. La tabla permite agregar un máximo de cuatro compresores en caso de ser necesario (Área de color verde). Si por algún motivo es necesario agregar algún otro se puede reemplazar cualquiera de los existentes sin ningún contratiempo para el normal funcionamiento de la herramienta. No obstante el usuario debe ser cuidadoso al momento del ingreso de la información debido a que requiere de mínimo tres datos de flujo (kg/s) y diferencia de

presión (Pa) tomados de la curva característica original del compresor, junto con los flujos (kg/s) mínimo y máximo operativos permitidos.

La Figura 5-3 muestra la imagen de la base de datos de compresores de la herramienta.

1	2	3	4	5	6	10	11	12	14	18	19	20
Compresor N°	Referencia - Catálogo	Costo (USD\$)	A (Pa*s ² /Kg ²)	B (Pa*s/g)	C (Pa)	Flujo mínimo (kg/s)	Flujo máximo (kg/s)		Optimización -Usar			
1	DR505AS72M - 50	2,311	-3,913,816.54	61,479.74	17,060.98	0.0057	0.0689		<input type="checkbox"/>			
2	DR555K72M - 60	3,279	-5,891,733.57	142,946.72	13,097.26	0.0057	0.0517		<input type="checkbox"/>			
3	DR555K72M - 50	3,279	-6,644,541.65	91,420.39	10,118.97	0.0057	0.0460		<input type="checkbox"/>			
4	DR404AL72M - 60	1,900	-5,891,733.57	142,946.72	13,097.26	0.0144	0.1296		<input type="checkbox"/>			
5	DR404AL72M - 50	1,900	-6,644,541.65	91,420.39	10,118.97	0.0144	0.1152		<input type="checkbox"/>			
6	DR505AS72M - 60	2,311	-2,635,722.48	22,704.01	20,351.49	0.0172	0.0862		<input type="checkbox"/>			
7	T3 60 TRIM - 56400	849	-758,270.57	-1,006.82	22,613.05	0.0227	0.0832		<input type="checkbox"/>			
8	T3 60 TRIM - 78800	849	-1,215,781.31	66,016.37	42,862.65	0.0416	0.1323		<input type="checkbox"/>			
9	T4 E 46 - 40000	1,199	-1,047,800.42	106,617.72	18,617.32	0.0454	0.1210		<input type="checkbox"/>			
10	T3 60 TRIM - 96300	849	-1,593,448.94	155,493.64	65,787.79	0.0529	0.1701		<input type="checkbox"/>			
11	T4 E 60 - 46020	1,249	-1,229,497.38	180,508.09	18,353.72	0.0529	0.1361		<input type="checkbox"/>			
12	60-1 - 40000	1,299	-200,283.04	18,609.83	21,909.16	0.0529	0.1890		<input type="checkbox"/>			
13	T3 60 TRIM - 110400	849	-2,552,195.39	398,696.63	78,779.35	0.0665	0.1890		<input type="checkbox"/>			
14	T4 E 46 - 69500	1,199	-432,882.20	-48,309.96	66,095.54	0.0756	0.2041		<input type="checkbox"/>			
15	TB 3000	95,332	-732,461.82	1,902,234.76	-116,367.51	1.1565	2.2928		<input type="checkbox"/>			
16	TB 6000	167,844	-167,263.17	851,442.20	33,660.26	2.2928	4.6059		<input type="checkbox"/>			
17	TB 9000	264,798	-165,294.07	1,591,741.73	-2,716,091.81	4.6059	6.8987		<input type="checkbox"/>			
18	TB 11000	279,791	-46,390.94	395,935.82	278,559.02	4.7073	8.2175		<input type="checkbox"/>			
19	CFA32	2,618,707	867,502	-2,816.28	1,480,000.00	8.1161	40.5803		<input type="checkbox"/>			
20	Centrifugo SIEMENS 10-8-8-70%	400,415	-135,747.78	2,448,732.53	-10,431,891.70	8.7000	10.3000		<input type="checkbox"/>			
21	Centrifugo SIEMENS 10-8-8-80%	473,307	-51,960.09	973,419.50	-3,869,168.21	9.0000	12.3000		<input type="checkbox"/>			
22	Centrifugo SIEMENS 10-8-8-90%	459,957	-20,792.09	460,353.99	-1,796,189.48	10.0000	15.5000		<input type="checkbox"/>			
23	Centrifugo SIEMENS 06-4-A - 70%	300,665	-2,073.63	115,008.75	296,796.60	27.0000	48.9000		<input type="checkbox"/>			
24	Centrifugo SIEMENS 06-4-A - 80%	448,488	-2,240.04	143,723.47	254,997.05	30.9000	56.6000		<input type="checkbox"/>			
25	Centrifugo SIEMENS 06-4-A - 90%	649,739	-1,950.93	131,991.91	1,179,058.72	36.0000	65.6000		<input type="checkbox"/>			
26	CFA34	5,050,790	121,5283	11,735.24	784,111.12	36.5223	121.7410		<input type="checkbox"/>			
27	Centrifugo SIEMENS 06-4-A - 100%	786,149	-2,922.11	262,128.73	1,673,745.47	43.7000	73.3000		<input type="checkbox"/>			
28	Centrifugo SIEMENS 06-4-A - 105%	1,086,294	-1,222.94	62,039.81	4,585,472.20	45.0000	78.5000		<input type="checkbox"/>			
29	TPB 1	62,231,008	0	-1046873.34	59490086.35	45.4612	54.5534		<input type="checkbox"/>			
30	TPB2	25,688,438	0	-200247.7	11379364.16	45.4612	54.5534		<input type="checkbox"/>			
31									<input type="checkbox"/>			
32									<input type="checkbox"/>			
33									<input type="checkbox"/>			
34									<input type="checkbox"/>			
35									<input type="checkbox"/>			
36									<input type="checkbox"/>			

Figura 5-3. Base de datos de compresores de la herramienta desarrollada.

Al costado derecho de la tabla de esta pestaña como se observa en la Figura 5-3, aparece una columna con el encabezado “Optimización-Usar”. Esta columna es en la que el usuario puede seleccionar los compresores que la herramienta debe considerar para la optimización de la red.

d) Accesorios

Para los accesorios se tienen tres tablas localizadas en la pestaña “7.ACCESORIOS”, la primera tabla contiene la información de las constantes del método de las 3K para el cálculo de pérdidas de presión por accesorios. También se muestra el exponente, el costo base y el tamaño de accesorio base para el cálculo de costos de compra de válvulas de corte tipo compuerta, bola, globo y cheque, codos de 45° y 90° y tees. El costo del accesorio se calcula con base en el método exponencial propuesto por (Perry R. H., 1999).

La segunda tabla muestra los costos para válvulas de corte tipo compuerta, bola y cheque con diámetros que van desde 1/2" hasta 42". La tercera tabla contiene los costos para codos de 45°, 90° y tees en el mismo intervalo de tamaños. Los costos de las tablas 2 y 3 se obtienen de aplicar el método exponencial por medio de la ecuación (5.1) utilizando los valores reportados en la tabla 1.

$$\text{Costo accesorio} = \text{Costo accesorio de tamaño base} \left(\frac{\text{Tamaño accesorio (in)}}{\text{Tamaño accesorio tamaño base (in)}} \right)^{\text{Exponente}} \quad (5.1)$$

El exponente que relaciona los tamaños de los accesorios se obtiene al hacer un ajuste de los costos reportados en el catálogo de productos Coval, con base en el costo del accesorio más pequeño que es el de 1/2". Las Tablas A2 y A3 del Anexo A del presente documento muestran los costos que conforman la base de datos de accesorios, mientras que la Tabla A7 muestra los valores de las constantes del método de las 3K para todos los accesorios disponibles en el mercado, en caso de requerir uno de los que no fue incluido en la base de datos del software, pueden ingresarse los valores para el accesorio en particular reemplazando alguno de los accesorios que por defecto vienen incluidos, esto no afecta el normal funcionamiento de la herramienta.

La Figura 5-4 muestra la imagen de la base de datos de accesorios de la herramienta.

Tabla 1.							Tabla 2.							Tabla 3.					
Accesorio	K1	Ki	Kd	Exponente	Costo base (USD)	Tamaño base (in)	Diámetro	Cheque	Bola	Globo	Compuerta	Diámetro (in)	Costo accesorio (COPS)	Codo 90°	Codo 45°	Tee			
Válvula gate	300	0.037	3.9	0.5	35.63	1/2	1/2	13.91	6.15	26.72	35.63	1/2	0.37	0.40	0.47				
Válvula bola	300	0.017	4.0	0.9	6.15	1/2	3/4	20.04	8.86	38.48	43.64	3/4	0.53	0.57	0.68				
Válvula globo	1500	1.7	3.6	0.9	26.72	1/2	1	25.96	11.48	49.85	50.39	1	0.69	0.74	0.89				
Cheque	2000	2.85	3.8	0.9	13.91	1/2	1 1/4	31.74	14.03	60.94	56.34	1 1/4	0.84	0.91	1.08				
Codo 90°	800	0.14	4.0	0.9	0.37	1/2	1 1/2	37.40	16.53	71.81	61.72	1 1/2	0.99	1.07	1.28				
Codo 45°	500	0.071	4.2	0.9	0.40	1/2	2	48.45	21.42	93.03	71.27	2	1.29	1.39	1.65				
Tee recta	200	0.091	4.0	0.9	0.47	1/2	2 1/2	59.23	26.19	113.72	79.68	2 1/2	1.57	1.70	2.02				
Tee como codo	500	0.274	4.0	0.9	0.47	1/2	3	69.79	30.85	134.00	87.28	3	1.85	2.00	2.38				
							4	90.41	39.97	173.60	100.78	4	2.40	2.59	3.08				
							6	130.23	57.58	250.05	123.43	6	3.46	3.73	4.44				
							8	168.72	74.59	323.94	142.53	8	4.48	4.83	5.76				
							10	206.24	91.18	395.99	159.35	10	5.47	5.91	7.04				
							12	243.02	107.44	466.60	174.56	12	6.45	6.96	8.29				
							14	279.19	123.43	536.04	188.55	14	7.41	8.00	9.53				
							16	314.84	139.19	604.49	201.57	16	8.35	9.02	10.74				
							18	350.05	154.76	672.09	213.80	18	9.29	10.02	11.94				
							20	384.87	170.15	738.94	225.36	20	10.21	11.02	13.13				
							22	419.34	185.39	805.13	236.36	22	11.13	12.01	14.31				
							24	453.50	200.49	870.71	246.87	24	12.03	12.99	15.47				
							26	487.37	215.47	935.75	256.95	26	12.93	13.96	16.63				
							28	520.99	230.33	1,000.29	266.65	28	13.82	14.92	17.78				
							30	554.36	245.09	1,064.37	276.01	30	14.71	15.88	18.91				
							32	587.51	259.74	1,128.03	285.06	32	15.59	16.83	20.05				
							34	620.46	274.31	1,191.28	293.83	34	16.46	17.77	21.17				
							36	653.21	288.79	1,254.17	302.35	36	17.33	18.71	22.29				
							42	750.43	331.77	1,440.82	326.58	42	19.91	21.49	25.60				

Los costos de los accesorios se calculan por medio del método del exponente, en el cual se toma como precio base el del accesorio de 1/2" cuyo precio fue cotizado directamente con proveedores. El precio de un accesorio de mayor tamaño se calcula como el producto del precio base por la relación de tamaños elevado al exponente respectivo como lo muestra la ecuación. El exponente es resultado del ajuste de los datos cotizados con proveedores para los distintos accesorios y cuyos valores se muestran en las tablas 2 y 3. La Tabla 1 muestra el exponente, costo base y tamaño base para cada accesorio. Adicionalmente muestra los valores de las constantes del método de las 3K para cálculo de pérdidas menores.

$$\text{Precio accesorio diámetro } D = \text{Precio accesorio } 1/2" \times \left(\frac{\text{Diámetro } D}{1/2"} \right)^{\text{exponente}}$$

[Regresar a portada](#)

Figura 5-4. Imagen de la base de datos de accesorios de la herramienta desarrollada.

5.2.2 Cálculo de propiedades del gas

Para el cálculo de propiedades del gas la herramienta tiene la pestaña “1.PROPIEDADES DEL GAS”. En esta, al introducir los valores indicados en las celdas de color amarillo, que corresponde a las fracciones molares de los gases que componen la mezcla de gas, temperatura del gas a condiciones de entrada a la red y la presión atmosférica, la hoja calcula el peso molecular, viscosidad dinámica, densidad, gravedad específica y el factor de compresibilidad de la mezcla de gases a ser transportados en la red. Estas propiedades son automáticamente indexadas en el módulo de cálculo hidráulico y de optimización que se describen en los numerales 5.2.3 y 5.2.4 respectivamente.

Con respecto al cálculo del factor de compresibilidad de la mezcla de gases, la pestaña cuenta con un formulario que permite seleccionar si este valor lo ingresa el usuario o si la hoja lo calcula por cualquiera de las siguientes ecuaciones de estado: *Peng-Robinson*, *Soave-Redlich-Kwong*, *Van Der Waals* ó *Redlich-Kwong*. Por otra parte en el caso en el que las fracciones molares introducidas por el usuario no sumen uno, la hoja de cálculo cuenta con el botón “Estandarizar fracciones” para realizar la normalización de las fracciones molares. La Figura 5-5 muestra la imagen de la hoja de cálculo de propiedades del gas.

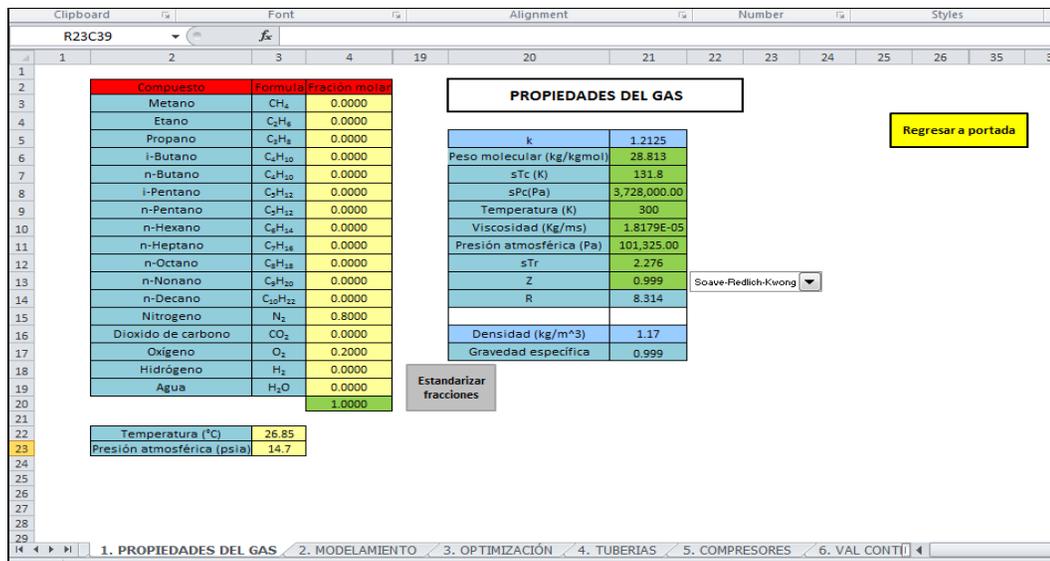


Figura 5-5. Imagen de la hoja de cálculo de propiedades del gas.

5.2.3 Módulo de cálculo hidráulico

El módulo de cálculo hidráulico se muestra en la pestaña “2. MODELAMIENTO” y es en este en el que se basa la mayor parte de los cálculos que realiza la herramienta, pues el usuario ingresa a través del módulo la descripción de cada uno de los elementos que componen la red. Los elementos con que la herramienta cuenta para que el usuario especifique las redes a calcular son: Tuberías y accesorios, compresores, válvulas de control, válvulas de seguridad (PSVs). Para especificar los componentes de la red el usuario debe ayudarse de las bases de datos descritas en el numeral 5.2.1.

Para ingresar un elemento en la red, el módulo cuenta con un formulario que da la opción de ingresar tubería, compresor, válvula de control o válvula de seguridad. Los accesorios vienen ligados a la tubería y en el caso en que el elemento adicionado a la red sea una tubería automáticamente se activan las celdas en las que se pueden especificar la cantidad y tipo de accesorio presente en el tubo. Adicionalmente dependiendo del elemento que se agregue, se habilitan las celdas que deben ser diligenciadas para tubería, compresor, válvula de control o válvula de seguridad según corresponda.

Otra información que debe diligenciar el usuario para especificar completamente la red es la referente a los nodos. La información relevante para la descripción de los nodos es: Altura con respecto a un punto de referencia tomado como cero, se debe aclarar si la presión en el nodo respectivo es conocida o desconocida y en caso de ser conocida ingresar el valor de la misma, también se debe ingresar si el nodo tiene algún flujo externo, en caso de tenerlo se debe especificar si es conocido o desconocido y si es conocido ingresar el valor del flujo, también se debe aclarar si el flujo externo es un suministro (Ingreso a la red) o es un consumo (Salida hacia usuario final). La Figura 5-6 muestra la imagen de la hoja de cálculo hidráulico – sección introducción de elementos y nodos.

Item	Tipo	Nodo inicial	Nodo Final	Altura Inicial (m)	Altura Final (m)	Tubería Diámetro nominal (m)	Compresor Número	Valvula Control Número	PSY tipo	Schedule	Material (e.s.444.5)	Diámetro interno (m)	Costo Tubería (USD/m)	Rugosidad (m)	Longitud (m)	Val. Gate	Val. Bola	Val. Globo	Cheque	Codo 90°	Codo 45°	Tee recta	Tee como codo	Cantidad de accesorios									
																								Nodo	Altura (m)	¿Presión conocida? Si/No	Presión (Pa)	¿Flujo externo? Si/No	¿Flujo externo conocido? Si/No	Ingreso flujo (kg/s)	¿Suministro o consumo? S ó C		
1	Tubería	1	2	10	10	6				40	G.C.S.	0.1541	128	0.00015	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10.0	si	104325.0	Si	No			S
2	Tubería	2	3	10	5	6				40	G.C.S.	0.1541	128	0.00015	680	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10.0	no		No				
3	Tubería	2	4	10	5	4				40	G.C.S.	0.1023	73	0.00015	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5.0	no		Si	Si	0.0882	C	
4	Tubería	2	5	10	5	6				40	G.C.S.	0.1541	128	0.00015	420	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5.0	no		Si	Si	0.0354	C	
5	Tubería	4	3	5	5	4				40	G.C.S.	0.1023	73	0.00015	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5.0	no		Si	Si	0.0632	C	
6	Tubería	4	5	5	5	4				40	G.C.S.	0.1023	73	0.00015	340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 5-6. Imagen de la hoja de cálculo hidráulico – sección introducción de elementos y nodos.

A medida que la información de cada uno de los elementos que componen la red se introduce en el módulo, la herramienta genera la representación gráfica del elemento. Esta representación debe numerarse y ubicarse en el área de color azul para armar el esquema de la red, esto con el fin de que el usuario tenga un apoyo visual que le facilite el manejo de la información, no obstante esto es meramente ilustrativo y no se tiene ninguna clase de link entre la representación gráfica del elemento y la información que se diligencia en la tabla para el mismo. Este módulo también cuenta con la sección de resultados o reporte hidráulico ubicado al lado derecho del área azul destinada para el armado de la red. En esta sección se muestran los flujos y presiones obtenidos de la rutina de cálculo hidráulico, también muestra el criterio de convergencia del cálculo y el número de iteraciones realizadas hasta alcanzar la convergencia. Arriba de la tabla de reporte se tiene el botón “Solucionar”, con el cual se ejecuta la macro que realiza el cálculo hidráulico. La Figura 5-7 muestra la imagen de la hoja de cálculo hidráulico – sección de esquema de la red y resultados.

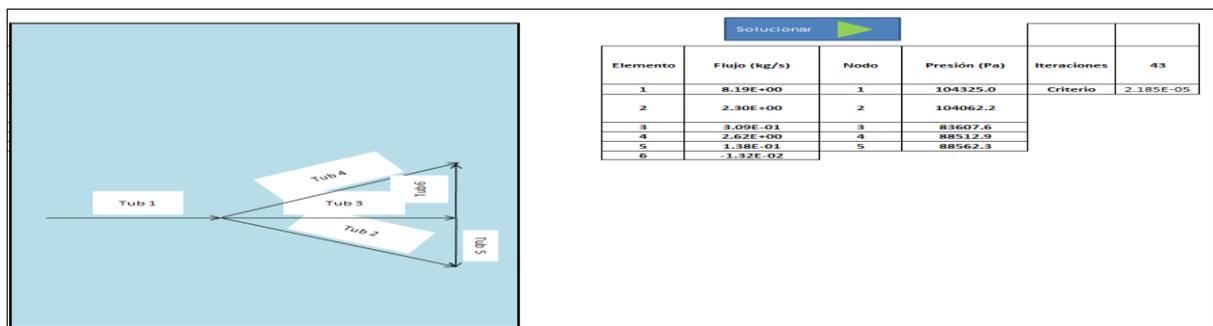


Figura 5-7. Imagen de la hoja de cálculo hidráulico – sección de esquema de la red y resultados.

5.2.4 Módulo de optimización

El módulo de optimización se encuentra en la pestaña “3.OPTIMIZACIÓN”. En esta debe especificarse información referente a la función objetivo a los atributos a tener en cuenta para la función objetivo de costo total anualizado de la red como son el costo de la energía eléctrica (CE en \$USD/kWh), el tiempo de vida de la red (t en horas/año), el F_1 y K_f que son factores asociados a costo de instalación de equipos y costos operativos respectivamente. Adicionalmente muestra los valores de referencia para la aplicación de los operadores del algoritmo evolutivo como son %Mutación, %Cruce y multiplicador poblacional, de estos operadores solamente se le permite modificar al usuario el % de mutación. La Figura 5-8 muestra la imagen de la pestaña del módulo de optimización.

Tipo elemento	Elemento (Uppercase)	Etapa	Elemento	Nodo inicial	Nodo final	Otros inicial (n)	Otros final (n)	NPS (n)	Diámetro interno (n)	Costo tubería (USD/m)	Sección	Mutación	Regeneración (n)	Longitud (n)	Val. Base	Costo (USD)	KI	Val. Base	Costo (USD)	KI	Val. Base	Costo (USD)	KI	Cheque	Costo (USD)	KI	Codo 30°	Costo (USD)	KI	Codo 45°
1	1 W	1	1	1	2	10	10	3	0.075	20.0	40	C.S.	4.5E-04	1	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1	2 W	1	1	2	3	10	5	3	0.075	20.0	40	C.S.	4.5E-04	600	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1	3 W	1	1	2	4	10	5	3	0.075	20.0	40	C.S.	4.5E-04	500	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1	4 W	1	1	2	5	10	5	3	0.075	20.0	40	C.S.	4.5E-04	420	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1	5 W	1	1	4	3	5	5	3	0.075	20.0	40	C.S.	4.5E-04	600	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1	6 W	1	1	4	5	5	5	3	0.075	20.0	40	C.S.	4.5E-04	340	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0

Figura 5-8. Imagen de la hoja del módulo de optimización.

Adicional a lo mencionado anteriormente respecto al módulo de optimización, en este se muestra una tabla que replica la información consignada en el módulo hidráulico para la red. Sobre esta tabla el software efectúa los cálculos de la optimización y en la segunda columna debe seleccionarse que elementos de la red se tienen en cuenta por el algoritmo evolutivo para optimizar el valor de la función objetivo. Para el ejemplo específico de la Figura 5-8 se muestra que la red cuenta con seis elementos todos ellos de tubería y fueron seleccionados los seis para la realización de la optimización. Al señalar el elemento que va a ser tenido en cuenta como variable de optimización automáticamente la hoja de cálculo lo resalta en color amarillo.

Vale la pena resaltar que a pesar de existir la pestaña “3.OPTIMIZACIÓN” sobre la cual se establecen los parámetros anteriormente mencionados, la ejecución de la rutina de optimización se realiza en la pestaña “2.MODELAMIENTO”. Para ejecutar el algoritmo de optimización desde el módulo de cálculo hidráulico es necesario hacer una modificación en el formulario seleccionando la opción “optimizar en lugar de “modelar” de manera que la macro implementada en el editor de Visual Basic ejecute la rutina referente a la optimización al pulsar el botón “Solucionar”. La Figura 5-9 muestra la imagen de la pestaña del módulo hidráulico en donde se selecciona en el formulario la opción “Optimizar”, si por el contrario lo que se quiere es realizar el cálculo hidráulico se debe escoger “Modelar” y pulsar el botón “Solucionar”.

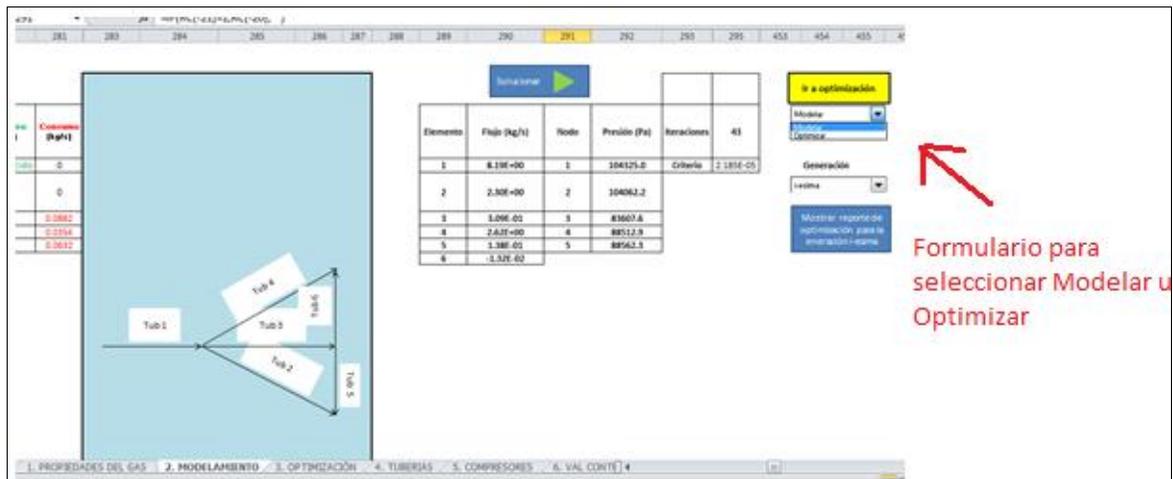


Figura 5-9. Imagen donde se muestra el formulario para seleccionar entre Modelar y Optimizar.

5.2.5 ¿Cómo crear un caso de trabajo?

El nombre de la herramienta computacional desarrollada es *UN-Gaspro V1.0* y una vez se abre el archivo *.xism* el usuario se encontrará con la portada de bienvenida. En ella se listan las diferentes pestañas con que cuenta el software. Esta portada permite al usuario, por medio de botones, desplazarse a la pestaña de interés y desde cada pestaña devolverse a la portada. La Figura 5-10 muestra la imagen de la portada del software.

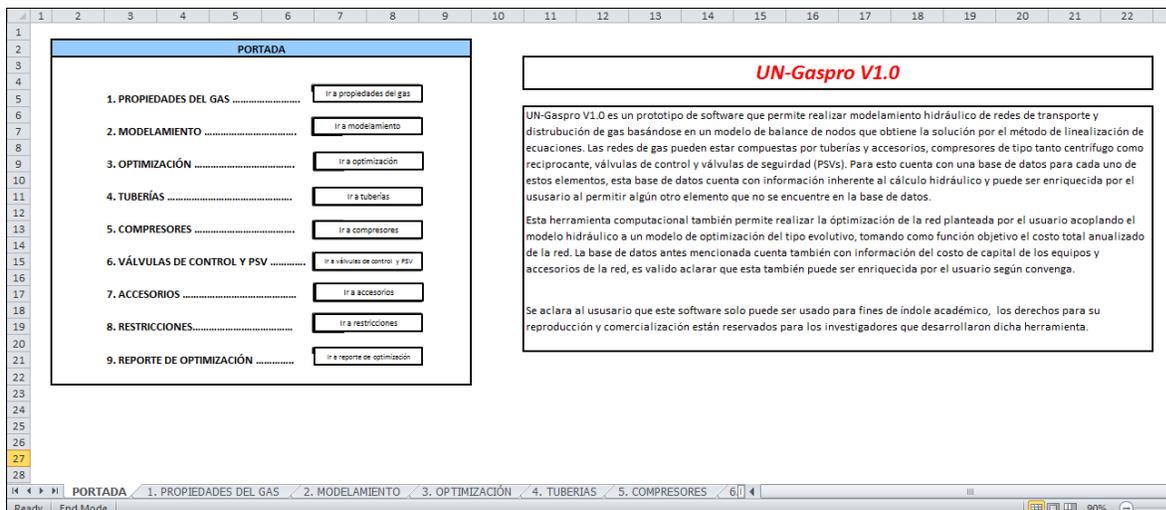


Figura 5-10. Imagen de la portada del software.

Para crear un caso de modelamiento y/u optimización debe guardar una copia del software con el nombre que el usuario crea pertinente para identificar plenamente el caso de interés. Posteriormente el usuario debe dirigirse, por medio del botón “Ir a propiedades del gas” a la pestaña “1.PROPIEDADES DEL GAS” y diligenciar los espacios requeridos para especificar el gas que se transporta y/o distribuye en la red. En la pestaña “2.MODELAMIENTO” debe introducir la información de cada uno de los elementos que componen la red, realizando a la par el armado del bosquejo en la zona de color azul con las representaciones gráficas que van apareciendo a medida que se agregan elementos. También se debe ingresar la información de los nodos teniendo en cuenta que es necesario especificarlos de manera clara y completa.

Con la red definida el usuario puede realizar el cálculo hidráulico de la red seleccionando del formulario existente en la pestaña “2.MODELAMIENTO” la opción “Modelar” y pinchar el botón “Solucionar”. Inicialmente el programa le preguntará al usuario cual es el valor de criterio de parada del algoritmo de cálculo hidráulico y cuantas iteraciones como máximo se deben realizar. Tan pronto el usuario especifica estos dos valores, la rutina de cálculo inicia y al cabo de algunos segundos el programa informa que se ha logrado una alcanzar una solución. Cuando esto sucede el software informa al usuario que ha alcanzado una solución y presionando la tecla “Intro” se muestra el reporte del modelamiento de la red. Si el usuario desea realizar la optimización de la red debe seleccionar en el formulario la opción “Optimizar” y en el formulario de generación escoger “Inicial”. Dirigirse a la pestaña “3. OPTIMIZACIÓN” seleccionar que elementos

de la red desea tener en cuenta en la optimización, diligenciar la información referente a la función objetivo y los operadores evolutivos, regresar a la pestaña “2.MODELAMIENTO” y oprimir el botón “Solucionar”, de esta manera el software inicia la rutina de optimización para la primera generación de individuos este proceso llevará algunos minutos dependiendo de la complejidad de la red ingresada. Como el proceso de optimización se basa en la creación de generaciones y el usuario es quien decide en que momento deja de hacer la optimización, al momento de evaluar el óptimo para una generación determinada pero diferente de la primera debe escoger en el formulario de generación la opción “i-ésima generación” y pulsar el botón “Solucionar”. En ese momento el software ejecuta la rutina de cálculo correspondiente lo cual toma unos cuantos minutos dependiendo nuevamente de la complejidad de la red, una vez evaluada la generación respectiva el software muestra un cuadro de dialogo en el que le informa al usuario que se ha alcanzado el óptimo de la generación i . De esta manera debe procederse hasta la generación que el usuario decida conveniente fijar como criterio de parada. Una vez finalizada la optimización el usuario debe oprimir el botón “Mostrar reporte de optimización para la generación i-ésima” y así acceder a la configuración de red óptima lograda luego de la ejecución de la rutina de cálculo, el contenido y ubicación de los reportes de modelamiento y optimización se describen en el numeral 5.2.7. Vale la pena aclarar que el usuario adicional a lo anterior debe especificar que elementos de la base de datos debe tener en cuenta para la optimización, esto se realiza acorde al numeral 5.2.1. del documento.

La Figura 5-11 muestra los dos formularios y los dos botones nombrados durante la descripción del uso de la herramienta.

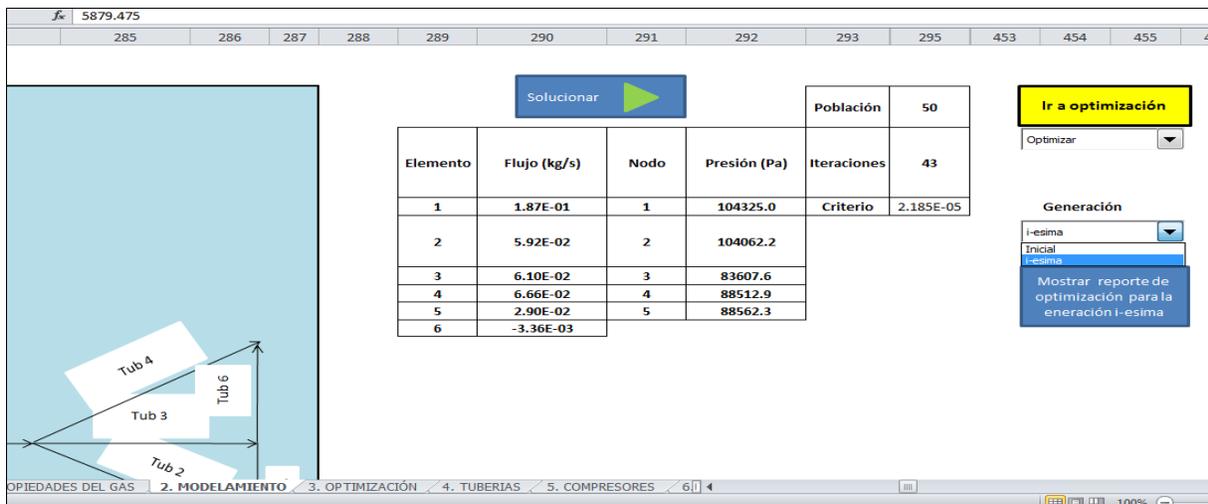


Figura 5-11. Imagen en donde se observan los dos formularios y los dos botones involucrados en los cálculos.

5.2.6 Rutinas de cálculo

De acuerdo con lo descrito en el capítulo 3, el modelo de cálculo hidráulico es una rutina de tipo iterativo en la cual inicialmente se plantean las ecuaciones de balance en cada nodo de la red, se plantea una matriz, se suponen unos valores iniciales de flujos y presiones y se recalculan por medio de la solución de la matriz repitiendo este proceso hasta alcanzar el criterio de convergencia establecido para el modelo.

Para la optimización lo que se hace es un acople entre el modelo hidráulico y el algoritmo evolutivo implementado, de manera que la rutina de cálculo para la optimización requiere de la solución hidráulica por el método iterativo para cada uno de los individuos que componen la población y para la cantidad de generaciones que el usuario decida calcular, aplicando en el intermedio de cada generación los operadores de selección, mutación y cruce.

La rutina de cálculo tanto hidráulico como la del modelo acoplado para la optimización se encuentran implementadas en el Visor de Visual Basic de Excel y fueron elaboradas con base en operaciones matemáticas sencillas que involucran sumas, restas, multiplicaciones, divisiones y solución de matrices, usando ciclos recurrentes como el “for” y el “Do while” complementado con condicionales “If” y “Case”.

5.2.7 Reportes que genera el programa

La herramienta computacional implementada muestra dos tipos de reporte, uno correspondiente al resultado del cálculo hidráulico y otro al resultado del módulo de optimización. A continuación se describe cada uno de ellos.

- **Módulo hidráulico**

Para este módulo la herramienta genera un reporte en el que se muestran los flujos en (kg/s) en cada uno de los elementos presentes en la red junto con las presiones en (Pa) para todos los nodos tanto de presión inicial conocida como desconocida obtenidos del cálculo hidráulico. Este reporte aparece en la pestaña “2.MODELAMIENTO” y se genera automáticamente cuando se pulsa el botón “Solucionar” que se encuentra en la misma pestaña del software. Este reporte también muestra el criterio de parada del cálculo iterativo y el número de iteraciones realizada por el software hasta alcanzar la convergencia. La Figura 5-12 muestra la imagen del reporte que genera el módulo de cálculo hidráulico junto con el botón “Solucionar”.

The screenshot shows a software window with a menu bar at the top containing tabs labeled 288, 289, 290, 291, 292, 293, and 295. Below the menu bar is a blue button labeled 'Solucionar' with a green play icon. To the right of the button is a small table with two columns and two rows. Below this is a larger table with six columns: 'Elemento', 'Flujo (kg/s)', 'Nodo', 'Presión (Pa)', 'Iteraciones', and a numerical value. The 'Iteraciones' column contains the value '43' and the word 'Criterio'. Below the main table is a navigation bar with four tabs: '1. PROPIEDADES DEL GAS', '2. MODELAMIENTO', '3. OPTIMIZACIÓN', and '4. TU'. The '2. MODELAMIENTO' tab is currently selected.

Elemento	Flujo (kg/s)	Nodo	Presión (Pa)	Iteraciones	43
1	8.19E+00	1	104325.0	Criterio	2.185E-05
2	2.30E+00	2	104062.2		
3	3.09E-01	3	83607.6		
4	2.62E+00	4	88512.9		
5	1.38E-01	5	88562.3		
6	-1.32E-02				

Figura 5-12. Imagen del reporte que genera el módulo de cálculo hidráulico.

- **Módulo de optimización**

El reporte del módulo de optimización muestra los flujos (kg/s) y presiones (Pa) de la red para la combinación de elementos óptima. También muestra los componentes de la red correspondientes a la configuración del óptimo, discriminando entre tubería, compresor, válvula de control y válvula de seguridad PSV. También indica el valor de la función objetivo (Costo total anualizado de la red), la penalización y la suma de la función objetivo y la penalización, todos estos valores expresados en (\$USD/año). La penalización por lo general tiene un valor de cero, no obstante puede darse el caso de óptimos con valores de penalización diferentes de cero.

Adicional a lo anterior, el módulo de optimización muestra el perfil óptimo, dicho perfil corresponde a los individuos con mejor valor de función objetivo desde la generación inicial hasta la generación establecida por el usuario como criterio de convergencia del algoritmo evolutivo. Este reporte aparece en la pestaña “9.REPORTE DE OPTIMIZACIÓN”, a diferencia del reporte del módulo hidráulico el reporte del módulo de optimización no se genera automáticamente, para obtenerlo se debe pulsar el botón “Mostrar reporte de optimización para la Generación i-ésima” la cual automáticamente y luego de una última verificación hidráulica muestra al usuario la pestaña “9.REPORTE DE OPTIMIZACIÓN”.

Las Figuras 5-13 y 5-14 muestran el botón “Mostrar reporte de optimización para la generación i-ésima” y reporte generado por el módulo de optimización respectivamente.

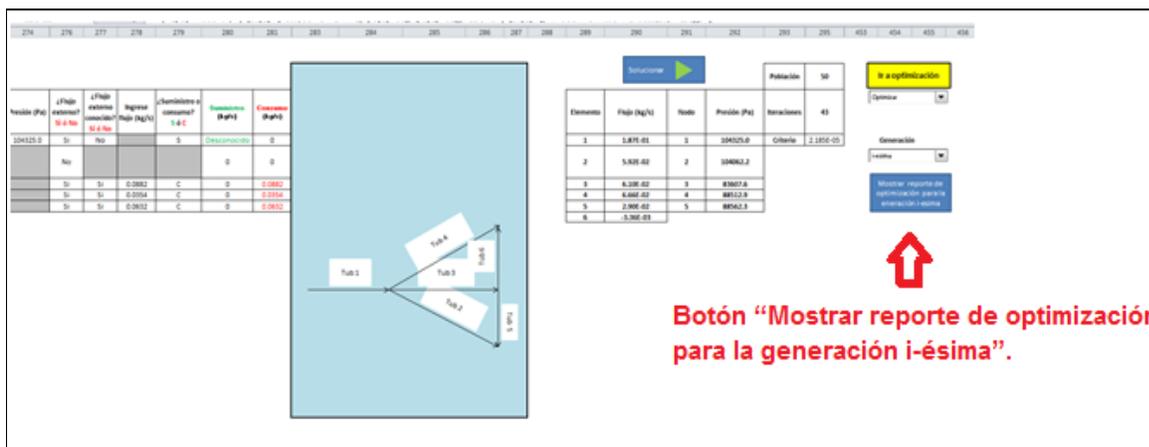


Figura 5-13. Imagen del botón “Mostrar reporte de optimización para la generación i-ésima”.

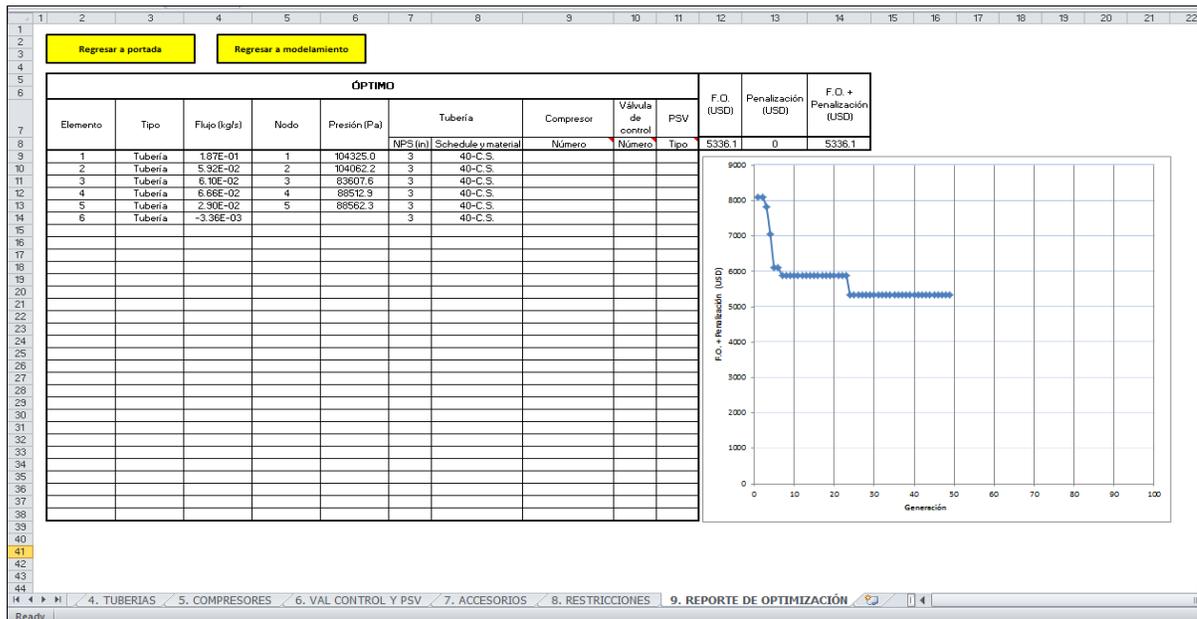


Figura 5-14. Imagen del reporte del módulo de optimización.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Luego de realizada la investigación se concluye lo siguiente:

- El modelo hidráulico desarrollado para el cálculo de presiones en los nodos y flujos en los elementos que componen gasoductos y redes de distribución de gas, obtiene resultados comparables con los reportados por otros autores en ejemplos de red evaluados en la literatura, adicionalmente son representativos y semejantes a los obtenidos al usarse software comercial. Todo lo anterior considerando estado estacionario y régimen isotérmico, y usando elementos de tubería, accesorios, válvula de control, válvulas de seguridad y compresores para la configuración de las redes.
- El modelo de optimización implementado muestra resultados satisfactorios al probarse en tipologías de red evaluadas hidráulicamente en diversas investigaciones y una de ellas llevada a nivel industrial. Para esto se usó un algoritmo evolutivo, estableciendo una función objetivo de costos que tiene en cuenta los costos anualizados de: capital, operación y mantenimiento de la red. Adicionalmente se manejan restricciones fuertes relativas a la disponibilidad de tubería, accesorios, válvulas de control, válvulas de seguridad y compresores, y restricciones suaves que son representativas de criterios técnicos tales como la velocidad erosional, el número de Mach en redes de relevo a tea, la presión de formación de hidratos que aplica para redes que manejan gas de origen hidrocarbúrico y la restricción de máximo producto de densidad del gas por velocidad al cuadrado.

- La herramienta computacional desarrollada permite realizar el modelamiento de gasoductos y redes de distribución de gas junto con la obtención de una red óptima basándose en una función de costos y cumpliendo restricciones de carácter ingenieril. Este prototipo de *software* cuenta con una base de datos con información para el cálculo de propiedades de mezcla de hasta 17 gases, entre estas propiedades se destacan el factor de compresibilidad, la viscosidad, la relación de calores específicos, la densidad y la gravedad específica. La base de datos también cuenta con información técnica y de costos de tubería, accesorios, compresores, válvulas de control y válvulas de seguridad, y puede ser complementada por el usuario para manejar dentro de los cálculos, elementos que no se tengan en la base de datos dándole versatilidad a la herramienta.
- La herramienta desarrollada, a pesar de ser útil para el cálculo hidráulico y optimización de costos en gasoductos y redes de distribución de gas, tiene limitaciones asociadas al programa utilizado para su implementación (*Visual Basic de Excel™*). Entre estas limitaciones se destacan el consumo de tiempo en los cálculos iterativos tanto en el componente hidráulico como en el de optimización y la baja capacidad de memoria RAM que tiene Excel™, esto último se debe a que la hoja de cálculo maneja su propia memoria RAM de menor capacidad a la del computador en que se ejecute la herramienta, esto hace que no sea posible establecer rutinas de cálculo más elaboradas y que permitan al usuario variar ampliamente los operadores del algoritmo evolutivo. A nivel de interfaz Excel™ también tiene limitantes que anulan la posibilidad de darle una mayor versatilidad a la herramienta computacional.

6.2 Recomendaciones

Durante el desarrollo de la investigación se contemplaron algunas actividades que fueron realizadas durante la implementación del *software*. No obstante algunas otras no fueron tenidas en cuenta debido a que no hacían parte del alcance del proyecto. A continuación se nombran estas actividades con el propósito de que sean tenidas en cuenta en investigaciones posteriores relacionadas con la temática tratada en este trabajo.

Estas recomendaciones son:

- Dado que los gases tienen cambios considerables en sus propiedades principalmente en la densidad para grandes caídas de presión, se sugiere para futuras investigaciones que en redes de transporte con tuberías de gran longitud tales como los gasoductos, el software se modifique para que los tramos de tubería de longitud considerable se subdividan a su vez en tramos de menor longitud de manera automática, permitiendo calcular las propiedades del gas en nodos menos distantes y así tener simulaciones que representen de manera más adecuada el comportamiento de los sistemas modelados.
- En la implementación del software se planteó una función objetivo de costo total anualizado para el modelo de optimización. Pero existen otras funciones objetivo que pueden ser implementadas y estudiadas, tales como la suma de CAPEX y OPEX, el Valor Presente Neto o para el caso de redes que cuenten con compresores se puede tener en cuenta únicamente el costo asociado al consumo de potencia de la red despreciando el costo asociado a la construcción de la misma.
- La estrategia de optimización desarrollada descrita en el capítulo 4 corresponde a un algoritmo evolutivo, técnica altamente recomendada para los problemas de redes de tubería, ya que permite manejar variables continuas y discretas de manera que se alcanza el óptimo global y no un óptimo local de problema. La herramienta computacional desarrollada aprovecha estas bondades de este tipo de técnica de optimización e implementa un modelo de optimización mono-objetivo basándose únicamente en la función de costos de la red. No obstante esta técnica podría ser complementada por la realización de una optimización multi-objetivo, que contemple no solo una función de costos sino múltiples funciones objetivo que tengan en cuenta aspectos tales como normatividad ambiental, disponibilidad de materias primas para la construcción de la red ó el ruteo de la misma en la topografía del terreno.

- Para futuras investigaciones se recomienda la implementación de esta herramienta en un lenguaje de programación que permita una mejor versatilidad de la misma y de más fácil manejo para el usuario. También se sugiere que sea más eficiente al momento de resolver el cálculo hidráulico y así tener un menor consumo en memoria y tiempo durante la optimización, esto con el fin de que el prototipo sea llevado a un mayor nivel que contemple el uso no solo académico sino industrial, abriendo la oportunidad de generar software de talla internacional desarrollado en Colombia.

Anexo A. Costos y características de tubería, accesorios, válvulas de seguridad, válvulas de control y compresores comerciales.

Tabla A1. Características y costo de tubería comercial que conforma la base de datos de la herramienta computacional desarrollada.

NPS (in)	Schedule	Material	Diámetro interior (in)	Costo (USD\$/m)
½	40	C.S.	0.622	0.9
¾	40	C.S.	0.824	3.4
1	40	C.S.	1.049	5.8
1 ¼	40	C.S.	1.380	8.3
1 ½	40	C.S.	1.610	9.7
2	40	C.S.	2.067	13.1
2 ½	40	C.S.	2.469	22.0
3	40	C.S.	3.068	28.0
4	40	C.S.	4.026	40.0
6	40	C.S.	6.065	66.0
8	40	C.S.	7.981	99.0
10	40	C.S.	10.020	114.0
12	40	C.S.	11.938	120.0
14	40	C.S.	13.125	125.0
16	40	C.S.	15.000	130.0
18	40	C.S.	16.876	136.0
20	40	C.S.	18.814	140.0
24	40	C.S.	22.626	160.0
½	40	G.C.S.	0.622	4.2
¾	40	G.C.S.	0.824	5.5
1	40	G.C.S.	1.049	8.2
1 ¼	40	G.C.S.	1.380	11.7

NPS (in)	Schedule	Material	Diámetro interior (in)	Costo (USD\$/m)
1 ½	40	G.C.S.	1.610	13.8
2	40	G.C.S.	2.067	18.5
2 ½	40	G.C.S.	2.469	33.0
3	40	G.C.S.	3.068	48.5
4	40	G.C.S.	4.026	73.0
6	40	G.C.S.	6.065	128.0
8	40	G.C.S.	7.981	171.0
14	10	C.S.	13.500	56.0
16	10	C.S.	15.500	69.0
18	10	C.S.	17.500	82.0
20	10	C.S.	19.500	96.0
24	10	C.S.	23.500	126.0
30	10	C.S.	29.376	140.0
8	20	C.S.	8.125	30.0
10	20	C.S.	10.250	42.0
12	20	C.S.	12.250	60.0
14	20	C.S.	13.375	63.0
16	20	C.S.	15.375	76.0
18	20	C.S.	17.375	91.0
20	20	C.S.	19.250	106.0
24	20	C.S.	23.250	140.0
30	20	C.S.	29.000	155.0
8	60	C.S.	7.813	46.3
10	60	C.S.	9.750	64.7
12	60	C.S.	11.626	64.8
14	60	C.S.	12.814	96.5
16	60	C.S.	14.688	117.5
18	60	C.S.	16.500	139.8
20	60	C.S.	18.376	164.0
24	60	C.S.	22.064	215.4
26	XS	C.S.	25.000	170.0
28	XS	C.S.	27.000	180.0
30	XS	C.S.	29.000	190.0
32	XS	C.S.	31.000	200.0
34	XS	C.S.	33.000	210.0
36	XS	C.S.	35.000	220.0
42	XS	C.S.	41.000	240.0

Fuente: Catálogo de productos Coval (www.coval.com.co).

Tabla A2. Costo de válvulas de corte disponible comercialmente que conforma la base de datos de la herramienta computacional desarrollada.

Diámetro	Costo Válvula (USD\$)			
	Cheque	Bola	Globo	Compuerta
½	13.91	6.15	26.72	35.63
¾	20.04	8.86	38.48	43.64
1	25.96	11.48	49.85	50.39
1 ¼	31.74	14.03	60.94	56.34
1 ½	37.40	16.53	71.81	61.72
2	48.45	21.42	93.03	71.27
2 ½	59.23	26.19	113.72	79.68
3	69.79	30.85	134.00	87.28
4	90.41	39.97	173.60	100.78
6	130.23	57.58	250.05	123.43
8	168.72	74.59	323.94	142.53
10	206.24	91.18	395.99	159.35
12	243.02	107.44	466.60	174.56
14	279.19	123.43	536.04	188.55
16	314.84	139.19	604.49	201.57
18	350.05	154.76	672.09	213.80
20	384.87	170.15	738.94	225.36
22	419.34	185.39	805.13	236.36
24	453.50	200.49	870.71	246.87
26	487.37	215.47	935.75	256.95
28	520.99	230.33	1,000.29	266.65
30	554.36	245.09	1,064.37	276.01
32	587.51	259.74	1,128.03	285.06
34	620.46	274.31	1,191.28	293.83
36	653.21	288.79	1,254.17	302.35
42	750.43	331.77	1,440.82	326.58

Fuente: Catálogo de productos Coval (www.coval.com.co) con ajuste por el método exponencial.

Tabla A3. Costo de codos de 90°, 45° y tees.

Diámetro (in)	Costo accesorio (USD\$)		
	Codo 90°	Codo 45 °	Tee
½	0.37	0.40	0.47
¾	0.53	0.57	0.68
1	0.69	0.74	0.89
1 1/4	0.84	0.91	1.08
1 1/2	0.99	1.07	1.28
2	1.29	1.39	1.65
2 1/2	1.57	1.70	2.02
3	1.85	2.00	2.38
4	2.40	2.59	3.08
6	3.46	3.73	4.44
8	4.48	4.83	5.76
10	5.47	5.91	7.04
12	6.45	6.96	8.29
14	7.41	8.00	9.53
16	8.35	9.02	10.74
18	9.29	10.02	11.94
20	10.21	11.02	13.13
22	11.13	12.01	14.31
24	12.03	12.99	15.47
26	12.93	13.96	16.63
28	13.82	14.92	17.78
30	14.71	15.88	18.91
32	15.59	16.83	20.05
34	16.46	17.77	21.17
36	17.33	18.71	22.29
42	19.91	21.49	25.60

Fuente: Catálogo de productos Coval (www.coval.com.co) con ajuste por el método exponencial.

Tabla A4. Costo y características de las válvulas de seguridad tipo API 526.

PSV tipo	ID (in)	Costo (USD\$)	Área (m ²)	Área (in ²)
D	0.3742	31.4	0.000071	0110
E	0.4996	38.3	0.000126	0.196
F	0.6252	45.2	0.000198	0.307
G	0.8003	58.5	0.000325	0.503
H	0.9997	71.5	0.000506	0.785
J	1.2801	90.6	0.000830	1.287
K	1.5298	103.0	0.001186	1.838
L	1.9059	184.7	0.001841	2.853
M	2.1409	213.7	0.002323	3.600
N	2.3507	288.1	0.002800	4.340
P	2.8501	330.7	0.004116	6.380
Q	3.7509	539.5	0.007129	11.050
R	4.5135	628.8	0.010323	16.000
T	5.7545	790.2	0.016779	26.008

Fuente: Catálogo de la marca LESER® facilitado vía correo electrónico por proveedor.

Tabla A5. Costos y características válvulas de control comerciales que conforman la base de datos de la herramienta computacional desarrollada.

Válvula N°	REFERENCIA	TIPO	DIAMETRO	COSTO (USD\$)	Cvmax	XT	d1	d2	ID (m)
1	Fisher Easy-ES	GLOBO	1/2	3800	6,53	0,622	1/2	1/2	0,0333
2	Fisher Easy-ES	GLOBO	3/4	4150	14,2	0,534	3/4	3/4	0,0333
3	HPA CLASE 1500	GLOBO	1	4200	19,5	0,542	1	1	0,0333
4	Fisher Easy-ED	GLOBO	1 1/4	4500	22,1	0,556	1 1/4	1 1/4	0,0333
5	Fisher Easy-ED	GLOBO	1 1/2	4700	44,0	0,597	1 1/2	1 1/2	0,0476
6	Fisher Easy-ED	GLOBO	2	6500	77,6	0,623	2	2	0,0587
7	Fisher Easy-ED	GLOBO	2 1/2	6700	109,0	0,652	2 1/2	2 1/2	0,0730
8	Fisher Easy-ED	GLOBO	3	6900	161,0	0,577	3	3	0,0873
9	Fisher Easy-ED	GLOBO	4	8500	251,0	0,694	4	4	0,1111
10	Fisher Easy-ED	GLOBO	6	13400	460,0	0,710	6	6	0,1778
11	Fisher Easy-ED	GLOBO	8	22900	863,0	0,827	8	8	0,2032
12	933642-120-20-A1	GLOBO	10	33000	1210	0,700	10	10	0,2572

Válvula N°	REFERENCIA	TIPO	DIAMETRO	COSTO (USD\$)	Cvmax	XT	d1	d2	ID (m)
13	933643-120-53-A1	MARIPOSA	14	34500	1720	0,700	14	14	0,3500
14	Fisher Easy-ED	MARIPOSA	16	44000	2020	0,671	16	10	0,2572
15	933642-120-13-A1	MARIPOSA	18	54000	10000	0,700	18	18	0,4500
16	933642-120-14-A1	MARIPOSA	20	76200	20000	0,700	20	20	0,5000
17	Keystone 106	MARIPOSA	24	164400	30000	0,700	24	24	0,6000
18	Keystone 106	MARIPOSA	30	200000	47000	0,700	30	30	0,7500
19	Keystone 106	MARIPOSA	36	250000	70000	0,700	36	36	0,9000

Fuente: Adaptado de cotizaciones y catálogos facilitados directamente por agentes comerciales en Colombia de las marcas Fisher, UOP, Keystone durante el primer semestre de 2013.

Tabla A6. Costo y constantes A, B y C compresores comerciales que conforman la base de datos de la herramienta computacional desarrollada.

Referencia – Catálogo	Costo (USD\$)	A	B	C	Flujo mínimo (kg/s)	Flujo máximo (kg/s)
DR505AS72M – 50	2,311	-3'913,816.54	61,479.74	17,060.98	0.0057	0.0689
DR555K72M – 60	3,279	-5'891,733.57	142,946.72	13,097.26	0.0057	0.0517
DR555K72M – 50	3,279	-6'644,541.65	91,420.39	10,118.97	0.0057	0.0460
DR404AL72M – 60	1,900	-5'891,733.57	142,946.72	13,097.26	0.0144	0.1296
DR404AL72M – 50	1,900	-6'644,541.65	91,420.39	10,118.97	0.0144	0.1152
DR505AS72M – 60	2,311	-2'633,722.48	22,704.01	20,351.49	0.0172	0.0862
T3 60 TRIM – 56400	849	-758,270.57	-1,006.82	22,613.05	0.0227	0.0832
T3 60 TRIM – 78800	849	-1'215,781.31	66,016.37	42,862.65	0.0416	0.1323
T4 E 46 – 40000	1,199	-1'047,800.42	106,617.72	18,617.32	0.0454	0.1210
T3 60 TRIM – 96300	849	-1'593,448.94	155,493.64	65,787.79	0.0529	0.1701
T4 E 60 – 46020	1,249	-1'229,497.38	180,508.09	18,353.72	0.0529	0.1361
60-1 – 40000	1,299	-200,283.04	18,609.83	21,909.16	0.0529	0.1890
T3 60 TRIM – 110400	849	-2'552,195.39	398,696.63	78,779.35	0.0665	0.1890
T4 E 46 – 69500	1,199	-432,882.20	-48,309.96	66,095.54	0.0756	0.2041
T4 E 60 – 69640	1,249	-1'837,403.42	486,378.16	26,433.62	0.0832	0.2419
60-1 – 69500	1,299	-572,170.61	140,340.93	46,382.07	0.0907	0.3024
T4 E 46 – 84000	1,199	-1'890,769.24	441,435.42	63,522.09	0.0945	0.2465
T3 60 TRIM – 121900	849	-2'636,220.14	550,681.23	87,926.72	0.0983	0.2177
60-1 – 84000	1,299	-1'024,125.98	426,134.18	44,271.68	0.1285	0.3780
T3 60 TRIM – 132800	849	-8'169,903.20	2'517,190.97	-49,517.81	0.1323	0.2344
T4 E 46 – 96200	1,199	-3'716,886.90	1'202,439.56	31,192.40	0.1338	0.2820

128 Desarrollo de una herramienta computacional para el dimensionamiento de gasoductos y redes de distribución de gas

Referencia – Catálogo	Costo (USD\$)	A	B	C	Flujo mínimo (kg/s)	Flujo máximo (kg/s)
T4 E 60 – 83272	1,249	-2'058,953.27	742,366.28	24,332.37	0.1361	0.3024
T3 60 TRIM – 143700	849	-8'124,238.69	2'715,093.09	-58,727.05	0.1588	0.2457
60-1 – 96200	1,299	-1'138,823.35	563,473.96	46,275.49	0.1663	0.4309
T4 E 60 – 96223	1,249	-2'286,351.44	929,219.53	28,837.91	0.1739	0.3402
T4 E 46 – 105500	1,199	-8'167,640.67	3'191,597.10	-148,647.03	0.1792	0.2873
T3 60 TRIM – 153700	849	1'631,549.49	-912,187.29	306,481.98	0.1890	0.2268
60-1 – 105500	1,299	-1'308,447.07	716,144.02	43,988.77	0.1890	0.4612
T4 E 60 – 104411	1,249	-5.038.134,01	2'495,558.97	-151,554.97	0.1966	0.3553
T4 E 46 – 113700	1,199	-15'223,047.35	6'923,728.93	-588,862.40	0.2079	0.3024
T4 E 46 – 120400	1,199	-21'324,719.44	10.380.266,64	-1'045,250.96	0.2268	0.3100
60-1 – 114200	1,299	-2'361,843.96	1'459,908.99	-50,496.84	0.2268	0.4687
T4 E 60 – 113660	1,249	-9'250,599.34	5'295,971.39	-567,615.04	0.2570	0.3780
60-1 – 120600	1,299	-3'032,576.13	2'057,713.81	-157,570.03	0.2646	0.4838
TUBLO	138,406	448.70	-17,147.85	332,736.42	0.3044	6.8946
TB 2000	89,839	-2'344,536.41	1'960,513.41	707,965.14	0.3246	0.9739
TB 3000	95,332	-732,461.82	1'902,234.76	-116,367.51	1.1565	2.2928
TB 6000	167,844	-167,263.17	851,442.20	33,660.26	2.2928	4.6059
TB 9000	264,798	-165,294.07	1'591,741.73	-2'716,091.81	4.6059	6.8987
TB 11000	279,791	-46,390.94	395,935.82	278,559.02	4.7073	8.2175
CFA32	2'618,707	867.50	-2,816.28	1'480,000.00	8.1161	40.5803
Centrifugo SIEMENS 10-8-B-70%	400,415	-135,747.78	2'448,732.53	-10'431,891.70	8.7000	10.3000
Centrifugo SIEMENS 10-8-B-80%	473,307	-51,960.09	973,419.50	-3.869.168,21	9.0000	12.3000
Centrifugo SIEMENS 10-8-B-90%	459,957	-20.792,09	460,353.99	-1.796.189,48	10.0000	15.5000
Centrifugo SIEMENS 10-8-B-100%	500,855	-15,522.52	348,802.45	-1.199.818,40	10.3000	16.5000
Centrifugo SIEMENS 10-8-B-105%	535,810	-12,412.93	299,213.64	-1.039.573,37	11.7000	17.8000
TPB3	29'500,000	0	-1'118,415.67	31777791,08	22.7306	27.2767
Centrifugo SIEMENS 06-4-A - 66%	249,730	-1,465.63	60,337.49	1.173.358,22	25.7000	46.3000
Centrifugo SIEMENS 06-4-A - 70%	300,665	-2,073.63	115,008.75	296.796,60	27.0000	48.9000
Centrifugo SIEMENS 06-4-A - 80%	448,488	-2,240.04	143,723.47	254.997,05	30.9000	56.6000
Centrifugo SIEMENS 06-4-A - 90%	649,739	-1,950.93	131,991.91	1'179,058.72	36.0000	65.6000
CFA34	5'050,790	121.53	11,735.24	784,111.12	36.5223	121.7410
Centrifugo SIEMENS 06-4-A - 100%	786,149	-2,922.11	262,128.73	1'673,745.47	43.7000	73.3000
Centrifugo SIEMENS 06-4-A - 105%	1'086,294	-1,222.94	62,039.81	4'585,472.20	45.0000	78.5000
TPB 1	62'231,008	0	-1'046,873.34	59'490,086.35	45.4612	54.5534
TPB2	25'688,438	0	-200,247.7	11'379,364.16	45.4612	54.5534

Fuente: Adaptado de cotizaciones realizadas directamente con agentes comerciales en Colombia de las marcas Siemens, Turbo, Ametek, Cameron e información de curvas de desempeño de los compresores, durante el segundo semestre de 2013.

Tabla A7. Constantes del modelo 3-K para accesorios.

Tipo de accesorio		K_1	K_i	K_d		
Codos	90°	Estándar, (R/D=1), roscado.	800	0.14	4.0	
		De radio largo (R/D=1,5), todos los tipos.	800	0.071	4.2	
		Estándar, (R/D=1), bridado/ soldado.	800	0.091	4.0	
		Estándar, (R/D=2), bridado/ soldado.	800	0.056	3.9	
		Estándar, (R/D=4), bridado/ soldado.	800	0.066	3.9	
		Estándar, (R/D=6), bridado/ soldado.	800	0.075	4.2	
		De inglete (R/D=1,5)	1 soldadura, Ángulo de 90°	1000	0.27	4.0
			2 soldaduras, Ángulos de 45°	800	0.068	4.1
			3 soldaduras, Ángulos de 30°	800	0.035	4.2
	45°	Estándar, (R/D=1), todos los tipos.	500	0.071	4.2	
		De radio largo (R/D=1,5), todos los tipos.	500	0.052	4.0	
		De inglete 1 soldadura, Ángulo de 45°	500	0.086	4.0	
		De inglete 2 soldaduras, Ángulo de 22,5°	500	0.052	4.0	
	180°	Estándar, (R/D=1), roscado.	1000	0.23	4.0	
		Estándar, (R/D=1), bridado/ soldado.	1000	0.12	4.0	
		De radio largo (R/D=1,5), todos los tipos.	1000	0.10	4.0	
	Tés	Usada como codo de 90°	Estándar, roscado.	500	0.274	4.0
			Radio largo, roscado.	800	0.14	4.0
Estándar, bridado o soldado.			800	0.28	4.0	
Tipo talón en rama.			1000	0.34	4.0	
Flujo recto		Estándar, roscado.	200	0.091	4.0	
		Estándar, bridado o soldado.	150	0.017	4.0	
	Tipo talón en rama.	100	0	0		
Válvulas	Ángulo 45°	Corte reducido $\beta = 1,0$	950	0.25	4.0	
	Ángulo 90°		1000	0.69	4.0	
	Compuerta		300	0.037	3.9	
	Bola		300	0.017	4.0	
	Tapón	Flujo rama	500	0.41	4.0	
		Directamente a través	300	0.084	3.9	
		Tres vías (Flujo a través)	300	0.14	4.0	
	Diafragma, tipo presa.		1000	0.69	4.9	
	Estándar, globo.		1500	1.70	3.6	
	Cheque	De levantar.	2000	2.85	3.8	
		Balanceado.	1500	0.46	4.0	

Fuente: Adaptado de (Kayode C., 2007)

Anexo B. Corrección por presión de la viscosidad de gases.

La Figura B1 muestra la correlación propuesta por “Petroleum Transactions AIME Vol 201 página 267 la cual se muestra en la Sección 23 Propiedades Físicas del Handbook de la GPSA. Esta corrección se aplica a la ecuación (1.2) que se muestra en el Capítulo 1 y consiste en multiplicar la viscosidad del gas calculada en función de la temperatura por la relación de viscosidades del eje vertical de gráfica de la Figura B1 la cual se determina teniendo en cuenta la pareja de presión y temperatura reducida del gas.

La ecuación B1 muestra la corrección por presión de la viscosidad del gas:

$$\mu_{gc} = \mu_g \times \mu_R = (A + BT + CT^2) \times \mu_R \quad (B1)$$

Donde: μ_g : Viscosidad (μP), A, B y C : Constantes propias del gas y T : Temperatura (K), μ_{cg} : Viscosidad corregida por presión (μP), μ_R : Relación de viscosidades Figura B1

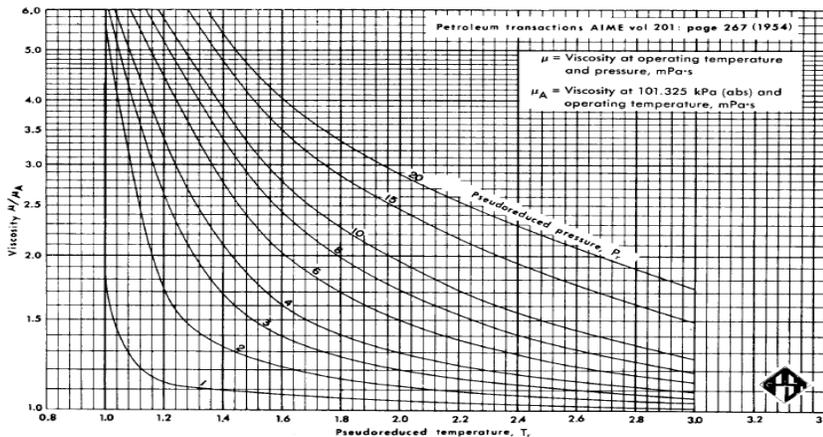


Figura B1. Correlación gráfica para la corrección por presión de viscosidad de gases naturales. Fuente: (GPSA, 2012)

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2000, "Recomended practice for Design and Installation of Pressure Relieving Systems in Refineries: Part I-Design", RP 520.
- [2] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2007, "Recomended practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping System", RP 14E.
- [3] BERTSIMAS D. and TSITSIKLIS J., 1993, "Simulated Annealing", Statistical Science Magazine, Vol 8 N°1, Pages 10-15.
- [4] CAMACHO L. A., 1989, "Implementación del diseño, análisis y optimización de redes de distribución y comparación de diferentes algoritmos", Tesis de maestría en ingeniería de recursos hídricos, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá D.C.
- [5] CARNERO M. et al, 2005, "Comparación de Estrategias para el Diseño Óptimo de Instrumentación en Plantas de Proceso", Información Tecnológica Volumen 16 N°5-2005, páginas: 57-63.
- [6] CHEBOUBA A. et al, 2008, "Optimization of natural gas transportation using ant colony optimization", Computer and operations research, 36th edition, pages 1916 to 1923.
- [7] CHEN, N., "An explicit Equation for Friction Factor in Pipe", Industrial, Engineering and Chemical Fundamentals, Volume 18, N° 3, 1979, Pages 296-297.
- [8] CENTRE FOR GAS HYDRATE RESEARCH, 2013 , HERIOT WATT INSTITUTE OF PETROLEUM ENGINEERING, "Why are gas hydrates important?", Website: http://www.pet.hw.ac.uk/research/hydrate/hydrates_why.cfm?hy=what, Issued 01-12-2013.
- [9] CONDE C. y SCHIAVI E., 2013, "Métodos numéricos de resolución de ecuaciones no lineales", Universidades Politécnica de Madrid y Rey Juan Carlos.

- [10] ECOPETROL, 2013, Gasoductos y campos de gas natural en Colombia, Disponible en: <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?conID=42585&catID=358>, consultado el 01-12-2013.
- [11] ENGINEERING DESIGN ENCYCLOPEDIA, 2013 “Compressor choke or stonewall”, 2013. Website: <http://www.enggcyclopedia.com/2012/02/compressor-choke-stonewall/>, Issued 01-12-2013.
- [12] EDGAR T., 2001. “Optimization of Chemical Processes”, McGraw – Hill, pages 250 - 260.
- [13] EL-MADHY O. et al, 2010, Computer aided optimization of natural gas pipe networks using genetic algorithm, Applied Soft Computing, Volumen 10, página 1141 a 1150.
- [14] FISHER, 2013 “Catálogo de válvulas de control”, Consultado en: http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CDYQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.documentation.emersonprocess.com%2Fgroups%2Fpublic%2Fdocuments%2Finstruction_manuals%2Fd100398x0es.pdf&ei=4TdKUrzfFZTi9gTS_4D4BQ&usq=AFQjCNHt6_VY8ys9-Vxlt1_nklwvljsE8A&bvm=bv.53371865.d.eWU, 01-12-2013.
- [15] GAS PROCESSOR ASSOCIATION, 2012, "Gas Processors Suppliers Association Data Book", 13th Edition.
- [16] HOOPER W., 1981 “The two-K method predicts head losses in pipe fittings”, Monsanto Co., Chemical Engineering Journal, 24-08-1981.
- [17] ICONTEC, 2005, Normas Técnicas Colombianas de la industria del gas Tomo I Gasoductos, Normas 2505, 3838, 3349, 3728, 3624, 1746 y 2576.
- [18] ISAACS, L. et al, 1980 “Linear theory methods for pipe networks analyses”. Journal of The Hydraulics Division. Volume 106, Number HY7, July 1980, Pages 1191-1201.
- [19] JEPSON, R.W., et al, 1975 “Pumps and reservoirs in network analyses”. Journal of The Hydraulics Division. Volume 101, Number HY3, March 1975, Pages 576-580.

-
- [20] KANDELL, P., 1981 "Program Sizes Pipe and Flare Manifolds for Compressible Flow", Chemical Engineering Journal, Jun 29, 1981, Pages 89-93.
- [21] KAYODE, C., 2007 "Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants", Volumen I, 4th edition, , Gulf Professional Publishing of ELSEVIER, Oxford UK.
- [22] MARTIN, F.A., 2006 "Herramientas de la inteligencia artificial bioinspiradas", Proyecto de fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid.
- [23] MARTINEZ C., 2011 "Apuntes de clase Optimización de Procesos en Ingeniería Química", Marzo 2011.
- [24] MATEOS, A., 2012 "Algoritmos evolutivos y algoritmos genéticos", Proyecto de fin de carrera Ingeniería en Telecomunicación, Inteligencia de redes de comunicaciones, Universidad Carlos III de Madrid.
- [25] MOHIPOUR M. et al, 2000, Pipeline design and construction a practical approach, ASME Press.
- [26] MONTESINOS M. et al, 1997 "Optimización de redes de distribución de agua utilizando un algoritmo genético", Ingeniería del Agua, Volumen 4, Número 1, Páginas 71 a 77.
- [27] NARVAEZ P., 1998, "Prototipo de software para el dimensionamiento de redes de flujo a presión", Tesis de Maestría en Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia.
- [28] NARVAEZ P. et al, 1999, "Solución de redes hidráulicas mediante la aplicación del modelo de balance de nodos y el método de linealización de ecuaciones", Revista ingeniería e investigación Número 42, Páginas 31 a 38.
- [29] NARVAEZ P., 1999, "Solución de redes de flujo para gases usando el balance de nodos y método de linealización de ecuaciones", Revista ingeniería e investigación Número 44, Páginas 56 a 62.

- [30] NARVAEZ P., GALEANO H., 2003, "Genetic Algorithms for the optimization of pipeline systems for liquid distribution (1)", Revista Ciencia, tecnología y Futuro, Volumen 2, Número 4.
- [31] NARVAEZ P., 2004, "Ecuación de costos y función objetivo para la optimización del diseño de redes de flujo de líquidos a presión", Revista Ingeniería e Investigación, páginas 23 a 29.
- [32] NARVAEZ P., GALEANO H., 2004, "Genetic Algorithms for the optimization of pipeline systems for liquid distribution (2)", Revista Ciencia, tecnología y Futuro, Volumen 2, Número 5.
- [33] OSIADACZ A. J., 1987, "Simulation and analysis of gas network", Gulf publishing company, Houston, London, Paris, Tokyo.
- [34] OSIADACZ A. J., 2001, "Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models", Chemical Engineering Journal 81, Pages 41 to 51.
- [35] PERRY, D.E. et al, 1991 "Models of Software Development Environments" IEEE Trans.Softw.Eng., Volume 17 Number 3, March 1991, pages .283-295.
- [36] PERRY, R. H., 1999 "PERRY'S CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK", McGraw-Hill, 9th Section Process Economics, 7th edition.
- [37] PETERS, M. S. and TIMMERHAUS, K. D., 2003 "Plant design and economics for chemical engineers, Mc GRAW-HILL, Chemical and Petroleum Engineering Series, 5th edition.
- [38] PEÑA, R. et al 2013 "Excel 2013 Manual práctico para todos", Alfaomega y Altaria publicaciones, Primera edición, México-España.
- [39] RUAN, Y. et al, 2008, "A procedure to design the mainline system in natural gas networks", Applied Mathematical Modeling.
- [40] SANVICENTE H. et al, 2002 "Aplicación del recocido simulado en la determinación óptima de diámetros de tuberías de redes de aguas", Información Tecnológica, Volumen 13, Número 3.

- [41] SINGIRESU R., 2009, "Engineering Optimization Theory and Practice", Fourth Edition, John Wiley and Sons, Inc.
- [42] STREETER, V.L. et al, 1999 "Mecánica de fluidos". Novena edición, Santafé de Bogotá. McGraw Hill.
- [43] SUMING, W. et al, 1999, "Model Relaxations for the Fuel Cost Minimization of Steady-State Gas Pipeline Networks", U.S.A.
- [44] TORRELLA E., 2013. "Compresores centrífugos-aspectos energéticos", Consultado en:
http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CDwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.git.uji.es%2Fdocencia%2FApuntes%2FTEC_Frig%2FTF_4_COMP_CENTRIF.pdf&ei=YcBIUvrdO4Xe8ATe0YDIAg&usq=AFQjCNH8oVUxATrQiZXM4AZ0mpuzzWlgkg&bvm=bv.53217764,d.eWU, Issued 01-12-2013.
- [45] U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2013, "Annual Energy Outlook with projections to 2035", Issues in focus, pages 21 to 49, and "International Energy Outlook", U.S. Department of Energy, Washington D.C.
- [46] WANG J.L., 2003 "Global Phase Diagrams and Critical Phenomena of Binary Mixtures," Swinburne University of Technology, Center of Molecular Simulation, <http://www.swinburne.edu.au/ict/research/cms/documents/disertations/yswChap3.pdf>, 01-12-2013.
- [47] WILSON, G.G. and ELLINGTON, R.T., 1958 "Gas", Pages 45-56.
- [48] WONG P. J. and LARSON R. E., 1968, "Optimization of Tree-Structured Natural Gas Transmission Networks", Information and control laboratory, Stanford Research Institute, Journal of mathematical analysis and applications 24th edition, pages 613 to 626.
- [49] WOOD, D.J. et al, 1981 "Reliability of algorithms for pipe network analysis". Journal of The Hydraulics Division. Volume 107, Number HY10, October 1981, Pages 1145-1161.