



Casa abierta al tiempo

Universidad Autónoma Metropolitana

Azcapotzalco

Análisis de seguridad hidráulica como insumo de los planes maestros de administración de la integridad de ductos a presión

Por

IQ. Donají Berenice Domínguez Ramírez

Tesis sometida en cumplimiento parcial
a los requisitos para obtener el grado de

Maestra en Ingeniería de Procesos

Director de Tesis:

Dr. Gabriel Soto Cortés

Departamento de Energía, UAM-A

Co-director de Tesis:

Dr. Fabián Rivera Trejo

Departamento de UJAT



Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco
Posgrado en Ingeniería de Procesos

Análisis de seguridad hidráulica como insumo de los planes
maestros de administración de la integridad de ductos a
presión

Por

IQ. Donají Berenice Domínguez Ramírez

Tesis aprobada para su publicación en cumplimiento parcial
a los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería de Procesos

Por el Jurado de tesis

<u>Dra. Ismene Libertad Rosales Plasencia. UAM-A</u> Nombre	Presidente
--	------------

<u>Dr. Jorge Ramírez Muñoz. UAM-A</u> Nombre	Secretario
---	------------

<u>Dr. Rogelio Hernández Suarez. IMP</u> Nombre	Vocal
--	-------

<u>Dr. Gabriel Soto Cortés. UAM-L</u> Nombre	Vocal
---	-------

Coordinación de Sistemas Escolares
Sección de Registro Escolar

Fecha : 15/01/2015
Página : 1/1

CONSTANCIA DE PRESENTACION DE EXAMEN DE GRADO

La Universidad Autónoma Metropolitana extiende la presente CONSTANCIA DE PRESENTACION DE EXAMEN DE GRADO de MAESTRA EN INGENIERIA DE PROCESOS de la alumna DONAJI BERENICE DOMINGUEZ RAMIREZ, matrícula 2131800847, quien cumplió con los 202 créditos correspondientes a las unidades de enseñanza aprendizaje del plan de estudio. Con fecha dieciséis de enero del 2015 presentó la DEFENSA de su EXAMEN DE GRADO cuya denominación es:

**Análisis de seguridad hidráulica
como insumo de los planes
maestros de administración de la
integridad de ductos a presión.**

Cabe mencionar que la aprobación del Examen de Grado tiene un valor de 0 créditos y el programa consta de 202 créditos.

El jurado del examen ha tenido a bien otorgarle la calificación de:

APROBAR

JURADO

Presidenta

DRA. ISMENE LIBERTAD AMERICA ROSALES
PLASCENCIA

Secretario

DR. JORGE RAMIREZ MUÑOZ

Vocal

DR. GABRIEL SOTO CORTES

Vocal

DR. ROGELIO HERNANDEZ SUAREZ

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Metropolitana y todos mis profesores que contribuyeron en mi formación académica.

A mis padres y hermanos por su cariño, comprensión y apoyo incondicional en todo momento.

A Héctor por su cariño y apoyo durante todos estos años.

Al Dr. Soto por el apoyo y orientación brindados durante el desarrollo del presente trabajo.

Contenido

Resumen..... 9

Abstract..... 9

Advertencia 10

Capítulo 1 11

1. Introducción 11

 1.1 Peligros potenciales 12

 1.2 Hipótesis 13

 1.3 Objetivo de la tesis 13

 1.4 Justificación 13

 1.5 Descripción del contenido de la tesis 16

Capítulo 2 17

2. Descripción del caso de estudio 17

 2.1 Ubicación y perfil altimétrico del sistema..... 19

 2.2 Instalaciones superficiales 21

 2.3 Variables operativas..... 22

 2.3.1 Propiedades de los productos transportados..... 22

 2.3.2 Especificaciones de la tubería..... 23

 2.3.3 Especificaciones generales de operación 24

Capítulo 3 25

3. Peligros potenciales y zonas hidráulicamente vulnerables 25

 3.1 Peligros potenciales 25

 3.2 Zonas hidráulicamente vulnerables 26

 3.3 Descripción general de la metodología 26

 3.3.1 Primera etapa. Identificación de ZHV 27

 3.3.2 Simulación en estado permanente 29

 3.3.3 Simulación de envolventes de máximas presiones 41

 3.3.4 Cálculos para determinar el diámetro de los loops..... 44

 3.3.4.1 Tuberías en serie 45

 3.3.4.2 Tuberías en paralelo..... 47

 3.3.5.3 Tuberías en serie y paralelo (combinadas)..... 49

 3.3.5 Cálculo de presiones seguras de operación 50

 3.4 Etapa dos. Ponderación de peligros potenciales incluyendo variables hidráulicas. 52

3.4.1	Peligros potenciales: Categoría 2 (Corrosión interior).	53
3.4.2	Peligros potenciales: Categoría 6 (Equipo).	67
3.4.3	Peligros potenciales: Categoría 8 (Operaciones incorrectas).	69
3.4.4	Peligros potenciales: Categoría 9 (Clima y fuerzas externas).	70
Capítulo 4		72
4.	Correspondencia entre Peligros Potenciales y ZHV.....	72
4.1	Criterios de ponderación para peligros potenciales.....	72
4.1.1	Ponderación de peligros potenciales. Categoría 1 (Corrosión interna).....	73
4.1.2	Ponderación de peligros potenciales. Categoría 6 (Equipo)	75
4.1.3	Ponderación de peligros potenciales. Categoría 8 (Operaciones incorrectas).....	76
4.1.4	Ponderación de peligros potenciales. Categoría 9 (Clima y fuerzas externas).....	78
Capítulo 5		79
5.	Conclusiones y recomendaciones	79
6.	Referencias	81

Índice de figuras

Figura 1.1	Metodología del PAID	14
Figura 1.2	Diagrama de energía.....	15
Figura 1.3	Metodología del PAID bajo la hipótesis de este trabajo	16
Figura 2.1.	Diagrama del sistema caso de estudio	18
Figura 2.2.	Ubicación geográfica del caso de estudio.....	20
Figura 2.3.	Ubicación geográfica del caso de estudio.....	20
Figura 2.4	Ejemplo de un loop en el ducto.....	22
Figura 3.1.	Diagrama general para calcular un diagrama de energía	28
Figura 3.2.	Ejemplificación de líneas de energía en un ducto	29
Figura 3.3.	Diagrama para simular el estado permanente.....	30
Figura 3.4.	Diagrama de energía en estado permanente.....	40
Figura 3.5.	Diagrama para simulación en estado transitorio	42
Figura 3.6.	Diagrama de energía en estado transitorio	44
Figura 3.7.	Arreglo de tuberías en serie con cambio de diámetro	45
Figura 3.8.	Diagrama para cálculos en tuberías en serie.....	46
Figura 3.9.	Arreglo de tuberías en paralelo.....	47

Figura 3.10. Diagrama para cálculos en tuberías en paralelo	48
Figura 3.11 Diagrama para cálculos en tuberías en serie y paralelo.....	49
Figura 3.12. Diagrama para calcular presiones seguras	50
Figura 3.13. Diagrama de energía con presiones seguras de operación.....	51
Figura 4.1 Diagrama de energía con fallo de válvulas.....	76
Figura 4.2 Diagrama de energía SIN loops	77

Índice de tablas

Tabla 1.1 Categorías y peligros potenciales	12
Tabla 2.1 Especificaciones de oleoducto	19
Tabla 2.2 Hidrografía y demografía a lo largo del oleoducto	21
Tabla 2.3 Ubicación geográfica de los loops	22
Tabla 2.4 Especificaciones de la tubería	23
Tabla 2.5 Presión de succión y descarga en las estaciones.....	24
Tabla 3.1. Presión máxima de operación permitida.....	31
Tabla 3.2 Nivel de sobrepresión por golpe de ariete.....	43
Tabla 3.3 Peligros potenciales: Corrosión interior ¹	53
Tabla 3.4 Peligros potenciales: Corrosión interior ¹	54
Tabla 3.5 Corrosión interna de bajo riesgo $55\% < d/t < 60\%$	58
Tabla 3.6 Corrosión interna de bajo riesgo $50\% < d/t < 55\%$	59
Tabla 3.7 Corrosión interna de bajo riesgo $45\% < d/t < 50\%$	59
Tabla 3.8 Corrosión interna de bajo riesgo $40\% < d/t < 45\%$	60
Tabla 3.9 Corrosión interna de bajo riesgo $35\% < d/t < 40\%$	61
Tabla 3.10 Corrosión interna de bajo riesgo $30\% < d/t < 35\%$	62
Tabla 3.11 Corrosión interna de bajo riesgo $55\% \leq d/t < 60\%$	63
Tabla 3.12 Corrosión interna de bajo riesgo $50\% \leq d/t < 55\%$	63
Tabla 3.13 Corrosión interna de bajo riesgo $45\% \leq d/t < 50\%$	64
Tabla 3.14 Corrosión interna de bajo riesgo $40\% \leq d/t < 45\%$	65
Tabla 3.15 Corrosión interna de bajo riesgo $35\% \leq d/t < 40\%$	65
Tabla 3.16 Corrosión interna de bajo riesgo $30\% \leq d/t < 35\%$	66
Tabla 3.17 Peligros potenciales: Mal funcionamiento del equipo – Falla del sello/bomba ¹	67
Tabla 3.18 Peligros potenciales: Mal funcionamiento del equipo de relevo ²	67
Tabla 3.19 Peligros potenciales: Procedimientos de operación incorrectos o no aplicados ¹	69

Tabla 3.20 Peligros potenciales: Deslave – erosión ¹	70
Tabla 4.1 Ponderación de peligros potenciales	72

Acrónimos y símbolos

Símbolo	Descripción
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASNM	Altura Sobre el Nivel del Mar
CEPIP	Comité de Estudios del Posgrado en Ingeniería de Procesos
DCBI-A	División de Ciencias Básicas e Ingeniería Azcapotzalco
MAOP	Máxima presión de operación
MBD	Miles de barriles diarios
MIC	Detección de Corrosión Microbiológica
NOM	Norma Oficial Mexicana
PAID	Plan Maestro de Administración de la Integridad de Ductos
Pd	Presión de descarga
PEMEX	Petróleos Mexicanos
Pmáx	Presión Máxima
Po	Presión de operación
Ps	Presión de succión
PS	Presión Segura
SCC	Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos
SISCO	Sistema de Análisis de las Condiciones Operativas
SMYS	Esfuerzo máximo permisible
TAD	Terminal de Distribución
UAM-A	Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco
UEA	Unidad de Enseñanza Aprendizaje
UJAT	Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
ZHV	Zonas Hidráulicas Vulnerables

Análisis de seguridad hidráulica como insumo de los planes maestros de administración de la integridad de ductos a presión

Resumen

La norma que regula el transporte de hidrocarburos en el país es la NOM-027 de la cual se deriva el PAID (Plan Maestro de Integridad de ductos). En el PAID se aborda la administración de la integridad con un enfoque sistémico multidisciplinario y la identificación de peligros potenciales. Sin embargo se omite la consideración de las variables transversales al proceso (variables hidráulicas) que pudieran intensificar el riesgo. En la presente tesis se propone un sistema que servirá como caso de estudio. Se describe la metodología utilizada para realizar un análisis hidráulico y se estudia la relación de las variables de proceso transversales a los peligros potenciales. Se identifican los peligros potenciales del sistema y se desarrollan criterios para la ponderación entre los peligros potenciales y las variables hidráulicas.

Abstract

The safety transport of hydrocarbons in Mexico is regulated by the standard NOM- 027 (Mexican standard). The PAID (Master Plan of Pipeline Integrity), which arise from the NOM-027, is a systemic multidisciplinary methodology, based on the pipeline integrity, focused on identify potential hazards. However the PAID does not consider the transverse process variables (hydraulic variables), which may increase the risk. In this work, using a case study, a new methodology is developed. With this approach is possible to find the relationship between the transverse process variables and potential hazards. At the same time the hydraulic variables allow proposing risk levels associated with potential hazards.

Advertencia

La metodología que se desarrolla a lo largo de esta tesis se basa en un caso de estudio fundamentado en un sistema de conducción real. No puede considerarse como un estudio riguroso del sistema referido pues la información utilizada no representa las condiciones de operación reales además de que muchos de sus elementos fueron simplificados. De lo anterior el presente trabajo no puede usarse como referente para un propósito diferente al académico. Sin embargo, la metodología desarrollada es aplicable y extrapolable a sistemas reales.

Capítulo 1

1. Introducción

Actualmente los hidrocarburos son la fuente principal de energía en el mundo, de manera que el petróleo juega un papel de suma importancia cuando se habla de este tema.

En México Petróleos Mexicanos (PEMEX) es la empresa encargada de explorar, administrar, transportar y distribuir hidrocarburos. Ésta empresa es la más grande de Latinoamérica y es la principal contribuyente fiscal del país. A su vez, se divide en cuatro organismos: 1) PEMEX Exploración y Producción, 2) PEMEX Refinación, 3) PEMEX Gas y Petroquímica básica y 4) PEMEX Petroquímica. La segunda es la subsidiaria encargada del almacenamiento, transporte y distribución del petróleo crudo y de sus refinados a lo largo del país (PEMEX, 2013).

El transporte de estos productos se realiza mayoritariamente por ductos a presión que recorren miles de kilómetros a lo largo y ancho del país. Sin embargo, las normas que regulan los criterios para la administración de la integridad de dichos sistemas tienen su origen apenas hace unos pocos años. En el contexto internacional este tipo de regulación, que integra sistemáticamente todas las normas alrededor del transporte seguro de sustancias peligrosas, inició en 2001 con la implementación de la norma API 1160 "Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines", en los Estados Unidos (API, 2001).

En México, como consecuencia de la norma API 1160 se desarrolló la NOM-027-SESH-2010 denominada "Administración de la Integridad de Ductos de Recolección y Transporte de Hidrocarburos" (Secretaría de Energía, 2010). Esta norma regula el procedimiento a seguir para la evaluación de los posibles riesgos en el transporte y así disminuir la probabilidad de que ocurra algún accidente o incidente en los ductos. Además, la norma obliga a la identificación de los peligros potenciales, la cuantificación y la evaluación del riesgo, así como la administración de la integridad (Petróleos Mexicanos, 2011).

La NOM-027-SESH-2010 exige que las empresas operadoras de los sistemas de transporte, es decir PEMEX, desarrollen *Planes de Administración de la Integridad* (PAID) para cada uno de los ductos a su cargo a fin de "aterrizar" los requerimientos contenidos en la norma y con la especificidad necesaria. Actualmente, las subsidiarias involucradas trabajan en el desarrollo de los PAID, una tarea que se prolongará por varios años dada su complejidad. El inicio de esta tarea requirió, como etapa previa, la elaboración de un PAID

maestro denominado "Plan Maestro de la Administración de la Integridad de Ductos" el cual puede considerarse como la guía institucional para PEMEX que define los términos de referencia sobre los cuales implementar la norma 027 (PAID, 2010).

Por su parte en el PAID maestro se especifican los atributos y características de la información a recopilar y analizar para la identificación y caracterización de los peligros potenciales. Esta etapa es fundamental en la cuantificación del riesgo en términos probabilísticos la cual sumada a la evaluación de consecuencias permite hacer una priorización de las medidas de mitigación.

Aunque la filosofía detrás de la concepción de la NOM-027-SESH-2010 supone abordar la administración de la integridad con un enfoque multidisciplinario, la realidad es que la priorización de atención planteada en los PAID está muy lejos de esta idea y omite la consideración de las variables transversales al proceso.

La hipótesis de trabajo de esta investigación es considerar las variables de proceso transversales a los peligros potenciales que son las que resultan del análisis hidráulico del sistema. Para la evaluación de esta hipótesis se recurrirá a la identificación de los peligros potenciales para un sistema considerado como caso de estudio. Al mismo tiempo se identificarán las variables hidráulicas del proceso bajo la metodología de (Soto, et al., 2007a).

1.1 Peligros potenciales

La NOM-027-SESH-2010 establece la identificación de los peligros potenciales que habrán de considerarse dentro de los PAID. Se definen 24 peligros potenciales que se agrupan en 9 categorías (Tabla 1.1). El operador del sistema debe tomar en cuenta la posibilidad de que ocurra cada peligro potencial con el fin de priorizar las medidas de atención y mitigación (Secretaría de Energía, 2010).

Tabla 1.1 Categorías y peligros potenciales

No.	Categoría	Peligro potencial
1	Corrosión externa	✓ Corrosión exterior
2	Corrosión interna	✓ Corrosión interior
3	Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC, por sus siglas en inglés)	✓ Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC, por sus siglas en inglés)
4	Defectos de fabricación	✓ Costura defectuosa ✓ Metal Base defectuoso
5	Construcción	✓ Soldadura circunferencial defectuosa ✓ Falla por alineamiento ✓ Doble por flexión o pandeo
6	Equipo	✓ Falla de los empaques o anillos

		tipo O ✓ Componente rallado o roto ✓ Mal funcionamiento del equipo de control o relevo ✓ Falla del sello/bomba
7	Daño por terceros	✓ Falla instantánea/inmediata ✓ Modo de falla retardo ✓ Vandalismo ✓ Impacto de objetos arrojados sobre el ducto
8	Operaciones incorrectas	✓ Procedimientos de operación incorrectos o no aplicados
9	Clima y fuerzas externas	✓ Tormentas eléctricas ✓ Viento, tormentas o inundaciones ✓ Sismos ✓ Deslaves ✓ Huracanes ✓ Erosión ✓ Deslizamiento del lecho marino o del ducto

1.2 Hipótesis

De los 24 peligros potenciales evaluados en los planes de administración de la integridad de ductos al menos 20 de ellos deben considerar para su ponderación las variables dinámicas que tienen como origen un análisis de seguridad hidráulica.

1.3 Objetivo de la tesis

Desarrollar criterios para la ponderación de peligros potenciales en los planes de administración de integridad de ductos con base en variables hidráulicas, además se hará un énfasis especial en la corrosión externa e interna, aplicado al caso de estudio que se especificará más adelante.

1.4 Justificación

La concepción actual de los PAID considera que para la priorización de las medidas de mitigación del riesgo deben de cuantificarse las probabilidades de ocurrencia de los peligros potenciales y se contrastarán con la magnitud de sus consecuencias (Figura 1.1).

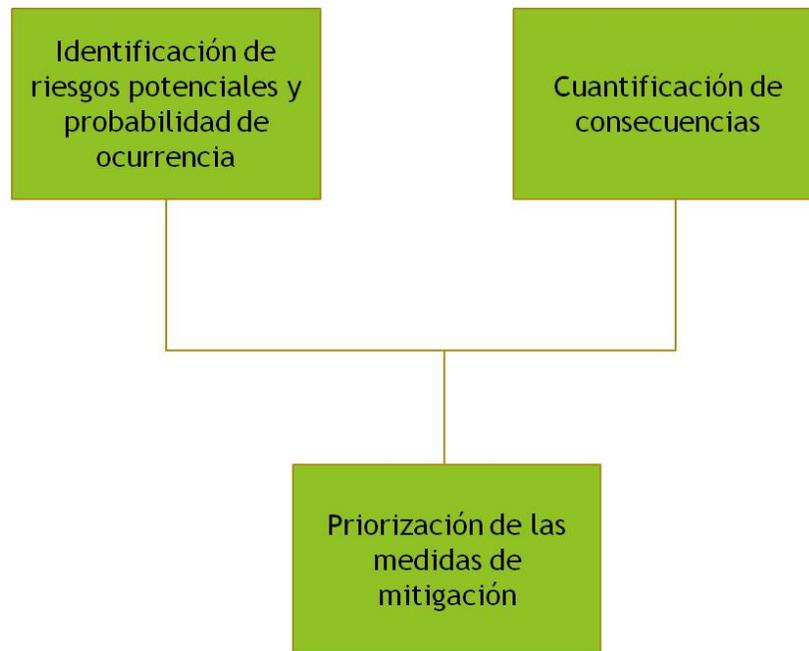


Figura 1.1 Metodología del PAID

Esta concepción omite la consideración de las variables transversales al proceso que pudieran intensificar el riesgo. Esta omisión tiene como consecuencia que dos peligros potenciales con la misma probabilidad de ocurrencia y similares consecuencias tengan el mismo nivel de prioridad aun cuando una variable hidráulica, como la presión de operación, sea radicalmente diferente en cada caso. Lo anterior se ejemplifica en la Figura 1.2.

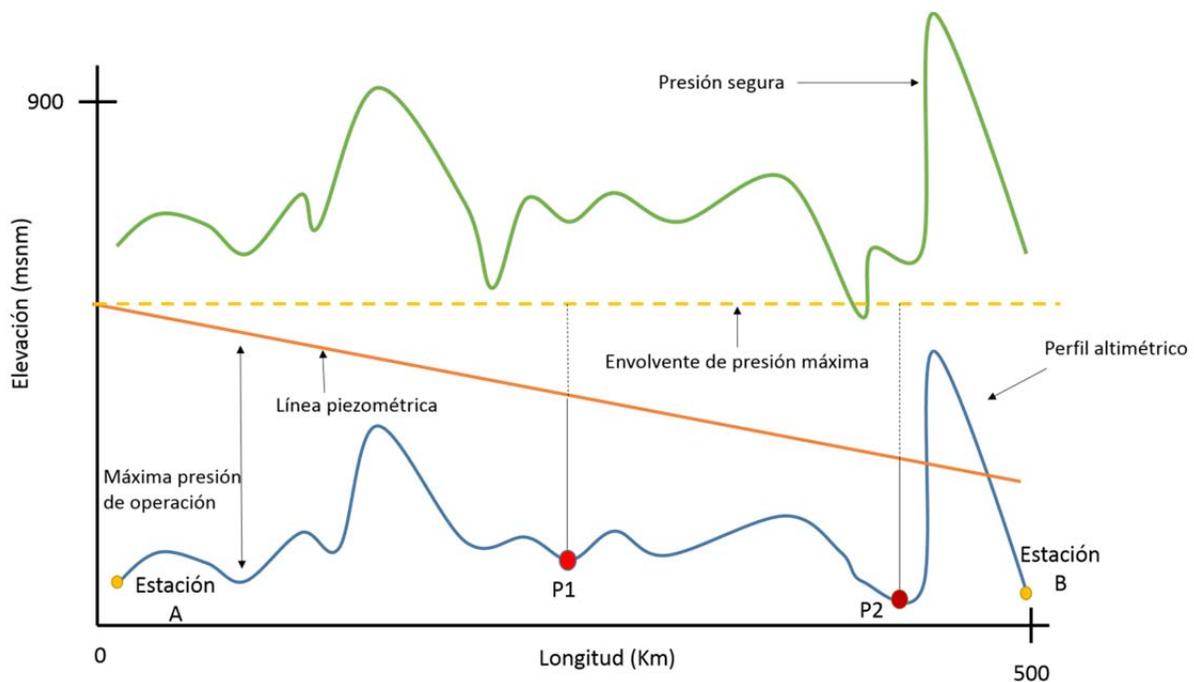


Figura 1.2 Diagrama de energía

El diagrama de energía de la Figura 1.2 muestra el perfil altimétrico (línea azul) de un ducto entre dos estaciones de bombeo (A y B). La línea piezométrica (línea naranja) representa el nivel que tiene la energía de presión a lo largo del sistema. Para un punto cualquiera de la línea de conducción, la distancia que hay entre el perfil altimétrico y la línea piezométrica representa la altura de presión o carga de presión interna en ese punto de la tubería y suele denominarse como la Máxima Presión de Operación (MAOP) para ese punto. La línea amarilla representa la envolvente de presión máxima que se presentará en la tubería bajo un escenario de un fenómeno transitorio (por ejemplo golpe de ariete). La línea de presiones seguras (línea verde) representa los niveles de presión máxima que puede soportar la tubería de manera confiable basados en la integridad mecánica actual del ducto, es decir considerando los daños ocasionados por la corrosión y el desgaste de los ductos. Los puntos P1 y P2 son dos puntos de la línea que para cierto riesgo potencial, por ejemplo corrosión externa, tienen la misma probabilidad de ocurrencia además de que sus consecuencias son comparables ¿Cuál de los dos puntos tiene prioridad de atención en términos de la concepción actual del PAID? La respuesta es que bajo esta interpretación de la norma (Figura 1.1) ambos tienen la misma prioridad.

Sin embargo si se consideran otras variables del proceso como la MAOP en cada punto o los niveles de presión en presencia de transitorios hidráulicos la priorización de atención podría cambiar radicalmente. Lo anterior sugiere que la concepción actual del PAID (Figura 1.1) es incompleta y se requiere la consideración de variables hidráulicas (Figura 1.3)

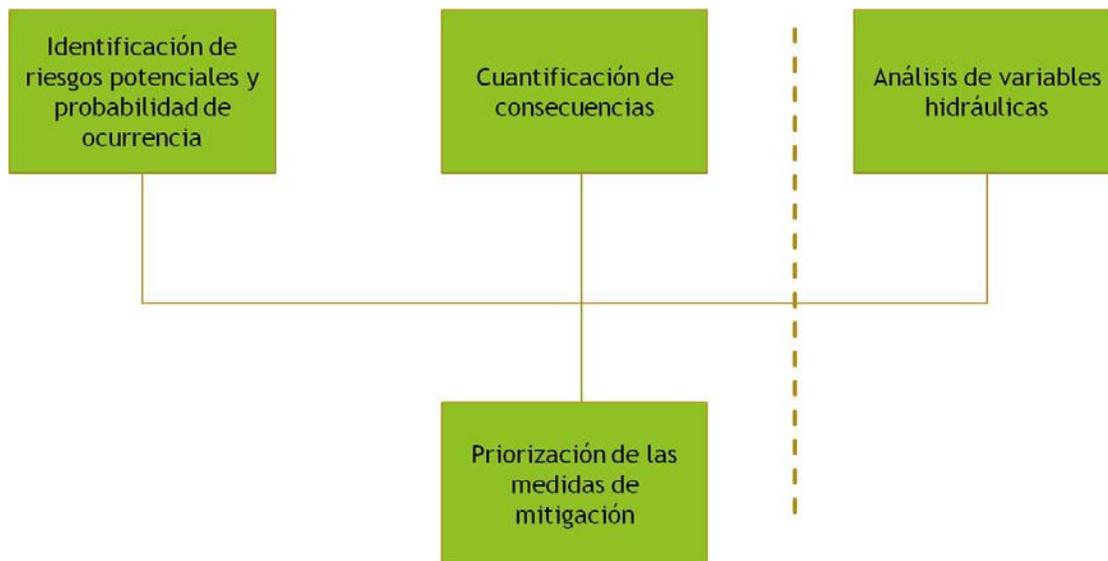


Figura 1.3 Metodología del PAID bajo la hipótesis de este trabajo

1.5 Descripción del contenido de la tesis

Se divide en cinco secciones: En la primera se presentó la introducción al tema, las normativas que regulan en el país el transporte de ductos, los objetivos de la tesis, la hipótesis y el por qué se propone esta simulación como complemento a las normativas mexicanas.

En el capítulo 2 se detalla el caso de estudio para esta simulación, la ubicación geográfica del sistema de ductos, sus especificaciones, las especificaciones de los loops (Ver pág. 21), el diagrama unifilar y las variables que se encuentran implicadas en el caso de estudio.

En el capítulo 3 se realiza una descripción general de la metodología utilizada para realizar la simulación. Primero se habla de la metodología utilizada para la simulación en estado permanente, posteriormente la simulación en estado transitorio. También se mostrarán las iteraciones que se realizaron para el cálculo de los loops y finalmente la metodología para el cálculo de las presiones seguras. Además se mostrarán los diagramas de energía como resultado de la simulación para cada condición del sistema.

En el capítulo 4 se habla sobre la ponderación de los peligros potenciales y su relación con las zonas hidráulicamente vulnerables. Se muestran las tablas que se obtuvieron con la simulación del proceso, en las cuales se analizarán las presiones que afectan el comportamiento del sistema.

Finalmente en el capítulo 5 se muestran las conclusiones y recomendaciones como resultado de la simulación del proceso. Se demuestra, con los resultados obtenidos, que la metodología propuesta es viable y complementa la interpretación de los PAID.

Capítulo 2

2. Descripción del caso de estudio

El sistema a estudiar consiste de un conjunto de tuberías que transporta crudo desde Nueva Teapa (en Veracruz) a Cadereyta (en Nuevo León). El sistema de transporte cuenta con dos líneas, la línea 1 con diámetro variable (30-24-20 pulgadas) y la línea 2 con diámetro constante (24 pulgadas). Ambas líneas comparten derecho de vía, esto quiere decir que comparten la misma geografía, hidrografía y demografía. En este proyecto se analizara la línea 1. Las tuberías de la línea 1 se encuentran conectadas en serie con diámetros nominales 30-24-20 pulgadas con una longitud total de 1179.185 km, cuenta con 4 loops en funcionamiento y 12 estaciones de bombeo y rebombeo, con un flujo variable de 370 mil barriles diarios (MBD) hasta Poza Rica y 250 MBD en el resto de la línea, esto se debe a que en Poza Rica hay una central de almacenamiento. La Figura 2.1 representa el diagrama unifilar del sistema de transporte que servirá como caso de estudio.

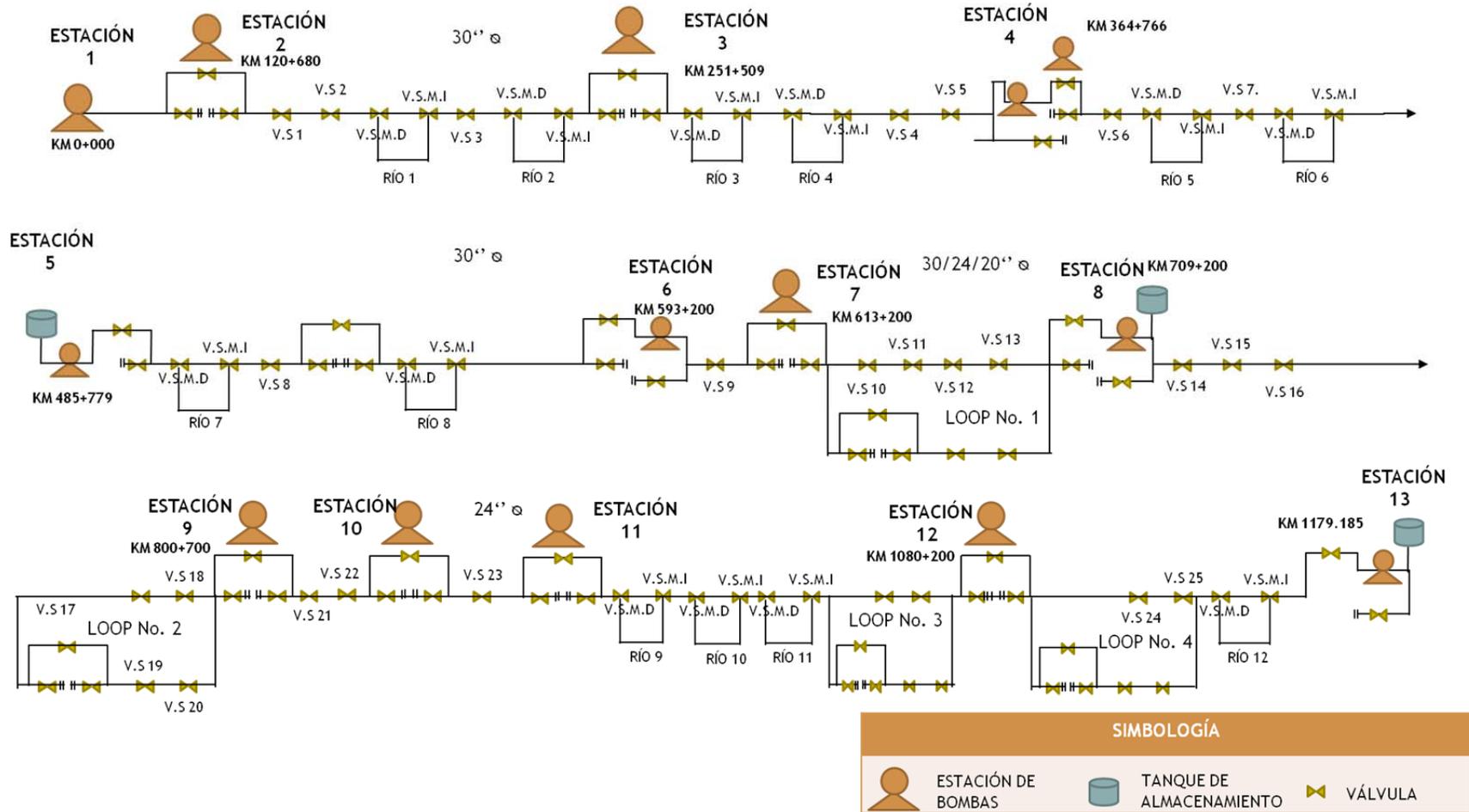


Figura 2.1. Diagrama del sistema caso de estudio

2.1 Ubicación y perfil altimétrico del sistema

El sistema de transporte se ubica entre los estados de Veracruz y Nuevo León, más específicamente entre las localidades de Nueva Teapa – Cadereyta, recorre una distancia de 1179.185 km, las elevaciones de las estaciones de bombeo oscilan entre 0 hasta 363 metros sobre el nivel del mar (Tabla 2.1). El perfil altimétrico del sistema se puede observar en la Figura 2.2.

Para ubicarlo geográficamente observamos la Figura 2.3, en la cual, cada estación de bombeo está representada por un color diferente iniciando en la estación 1 Nueva Teapa hasta la estación 12 en Cadereyta.

Tabla 2.1 Especificaciones de oleoducto

Estación	Longitud (km)	A.S.N.M (m)
1. Nuevo Teapa	0+00	34.05
2. Mazumiapan	120+47	42.20
3. El Tejar	250+97	10.52
4. Carranza	364+10	55.07
5. Poza Rica	484+20	58.72
6. Naranjos	593+20	51.60
7. Madero	709+20	10.11
8. González	800+70	97.00
9. Zaragoza	861+50	190.00
10. Victoria	945+20	295.00
11 Linares	1080+20	363.00
12. Cadereyta	1179+19	326.00

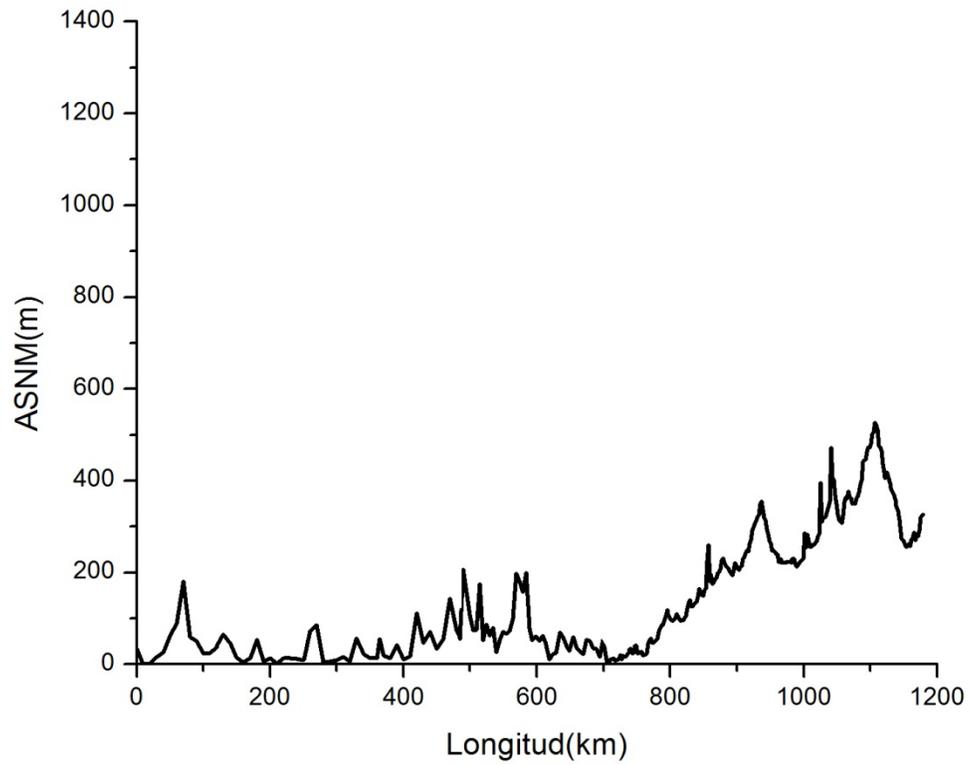


Figura 2.2. Ubicación geográfica del caso de estudio

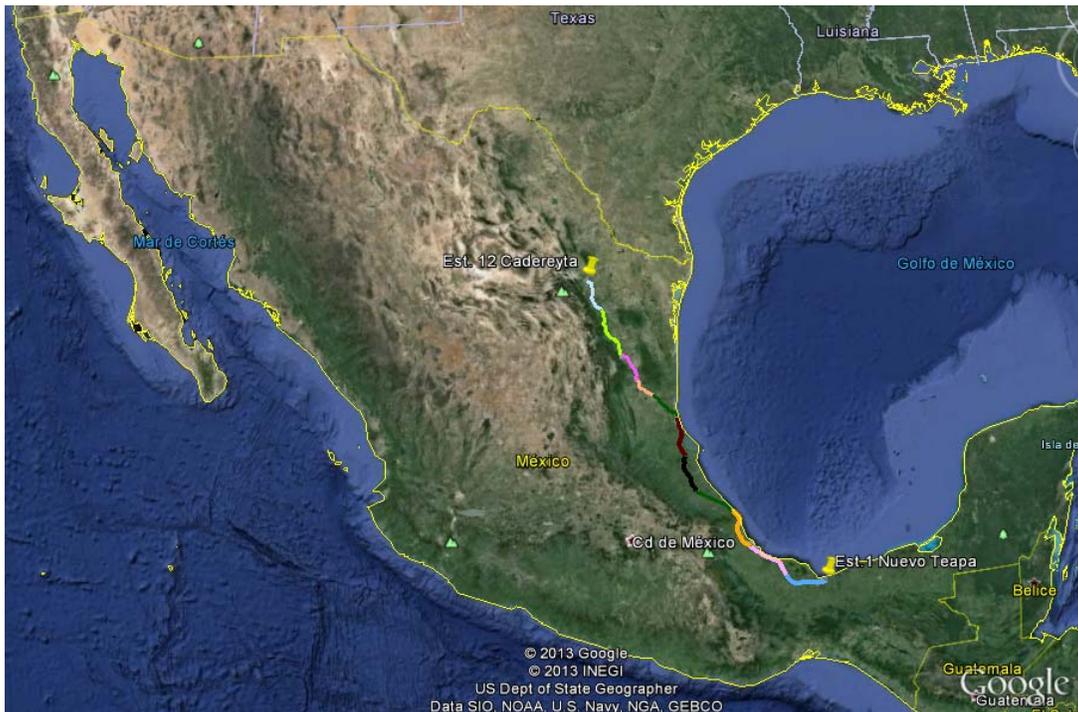


Figura 2.3. Ubicación geográfica del caso de estudio

Otro punto importante a señalar es que a lo largo del oleoducto se cruzan aproximadamente 23 ríos, alrededor de los cuales existen poblaciones con número variable de habitantes desde 400 hasta 193,311 habitantes (Tabla 2.2) (INEGI, 2014).

Tabla 2.2 Hidrografía y demografía a lo largo del oleoducto

#	Nombre del Escurrimiento Superficial	Posición [km]	ASNM [m]	Población	No. de habitantes
1	Río Tuxtla	115+10	30.979	El bebedero	400
2	Río Papaloapan	191+56	7.52	Tlacotalpan	13,845
3	Río Cotaxtla	242+91	11.04	---	---
4	Río Jamapa	246+80	9.62	Medellin de bravo	4,800
5	Río La Antigua	280+05	5.07	La antigua	25,409
6	Río Actopan	291+23	6.46	Barra de chachalacas, Ver.	1,433
7	Río Palma Sola	334+02	42.62	Palma sola	2,633
8	Río Santa Ana	351+50	12.99	Santa Ana	1,528
9	Río Yehuascalco	366+00	43.72	Emilio Carranza	5,425
10	<i>Río Misantla</i>	389+35	40.43	---	---
11	Río Nautla	402+49	12.31	El Pital	5,922
12	Río Tecolutla	452+26	38.31	---	---
13	Río Cazones	486+76	132.96	Poza Rica	193,311
14	Río Pantepec	543+99	50.55	---	---
15	<i>Río Buena Vista</i>	562+44	89.93	---	---
16	Río Tancochín	604+29	51.59	Naranjos, Ver.	27,548
17	Río Cucharas	629+93	31.87	---	---
18	Río Pánuco	712+22	10.35	Zona metropolitana de Tampico	85,9419
19	Río San Pedro	970+47	221.31	---	---
20	Río Santa Engracia	971+11	220.54	Santa Engracia	6606
21	Río Purificación	984+88	229.49	---	---
22	Río Pablillos	1077+65	351.27	Linares. Nuevo León	78669
23	Río San Juan	1173+40	295.40	---	---

2.2 Instalaciones superficiales

El sistema de transporte cuenta con 12 estaciones de bombeo y rebombeo, un diámetro variable de 30-24-20 pulgadas, además cuenta con aproximadamente 100 válvulas (Figura 2.1) y 4 loops en funcionamiento los cuales están conectados en paralelo al resto de la tubería.

Un loop es una tubería que transporta fluido en paralelo a la principal (Figura 2.4), por lo tanto el flujo volumétrico se divide entre los dos tubos. Estos loops en el sistema son de suma importancia en el correcto funcionamiento del ducto, debido a disminuir la presión de operación, a incrementar la capacidad de transporte a mitigar los efectos causados por sobrepresión en el caso de cierres bruscos. En la Tabla 2.3 se observa la ubicación de cada loop.

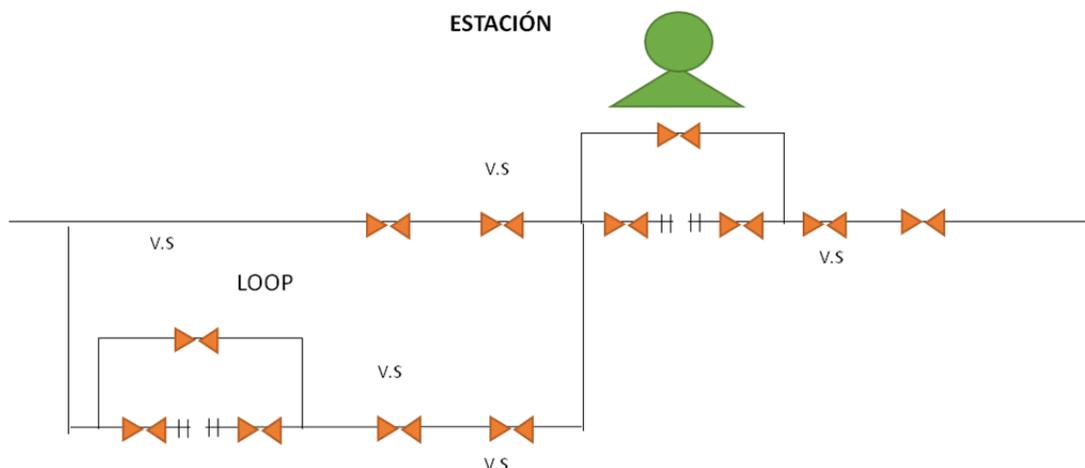


Figura 2.4 Ejemplo de un loop en el ducto

Tabla 2.3 Ubicación geográfica de los loops

#	Nombre del loop	Posición inicial [km]	Posición final [km]	ASNMI Inicial [m]	ASNMI final [m]
1	3 Hermanos-Madero	613+20	709.20	47.73	10.11
2	km 744+500-González	744+50	800.70	23.00	97.00
3	km 1013+200-Linares	1013+20	1080.20	261.00	363.00
4	Linares- km 1122+200	1080+20	1122.20	363.00	405.00

2.3 Variables operativas

2.3.1 Propiedades de los productos transportados

El hidrocarburo que se transporta cuenta con una viscosidad cinemática, ν , de 27 cS. La viscosidad cinemática considera las fuerzas debidas a la viscosidad junto con las fuerzas de inercia, que dependen de la densidad, por eso la

viscosidad cinemática es la viscosidad del fluido, μ , dividida entre la densidad del fluido, ρ .

Tiene una gravedad específica, s , de 0.895. La gravedad específica es una comparación de densidades entre el fluido, en este caso el hidrocarburo, y el agua.

Y un modulo de elasticidad volumétrica del crudo, β , de 2060 Mpa. El módulo de elasticidad relaciona los cambios de volumen, o bien los cambios de densidad que se provocan en el fluido por efecto de la aplicación del incremento de presión.

Las variables operativas son constantes debido a que se considera que el fluido no sufre cambio de temperatura, ni de densidad, ni de ninguna otra de sus propiedades a lo largo del tiempo.

De acuerdo al Instituto Americano del Petróleo (API, 2001), el crudo que se extrae en esta zona es de mediana densidad de acuerdo con su gravedad específica.

2.3.2 Especificaciones de la tubería

La tubería está hecha de acero al carbón API 5L (X52). De acuerdo con la norma (API, 2001), cuenta con un diámetro y espesor variables a lo largo de su longitud los cuales se muestran en la Tabla 2.4 El esfuerzo máximo permisible, SMYS, para estas condiciones de tubería es de 52000 psi; el modulo de Young, E , es de 206000 MPa; y el factor de diseño, F_d , de 0.72 (ASME, 1991).

Tabla 2.4 Especificaciones de la tubería

Tramo	e (in)	Diámetro exterior (")
Nuevo Teapa - Mazumiapan	0.312	30
Mazumiapan - El Tejar	0.312	30
El Tejar - Carranza	0.312	30
Carranza - Poza Rica	0.312	30
Poza Rica - Naranjos	0.312	30
Naranjos - 3 Hermanos	0.312	30
3 Hermanos- Madero (Loop)	0.250	24
Madero -km 744 +500	0.250	24
km 744+500-González (Loop)	0.250	24
González - Zaragoza	0.344	24
Zaragoza - Victoria	0.344	24
Victoria - km1013+200	0.406	24
km 1013+200-Linares (Loop)	0.344	24

Linares- km 1122+200 (Loop)	0.312	24
Cadereyta	0.250	24

2.3.3 Especificaciones generales de operación

El sistema transporta 370 MBD de Nueva Teapa a Poza Rica y 370 MBD de Poza Rica hasta la terminal Cadereyta. Con fines de simulación se estima que la eficiencia del equipo de relevo es del 80% en todos los casos

Las presiones de succión y descarga son variables en cada estación como se muestra en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Presión de succión y descarga en las estaciones

Estación	Elevación [msnm]	Posición [km]	Ps [kg/cm ²]	Pd [kg/cm ²]
1. Nuevo Teapa	34+05	0.00	n.a.	46.10
2. Mazumiapan	42+20	120.47	6.00	45.82
3. El Tejar	10+52	250.97	6.00	46.96
4. Carranza	55+07	364.10	6.00	45.58
5. Poza Rica	58+72	484.20	6.00	30.38
6. Naranjos	51+60	593.20	13.00	21.12
7. Madero	10+11	709.20	3.00	36.17
8. González	97+00	800.70	4.00	45.33
9. Zaragoza	190+00	861.50	7.00	57.68
10. Victoria	295+00	945.20	7.00	57.01
11 Linares	363+00	1080.20	7.00	33.62
12. Cadereyta	326+00	1179.19	4.00	n.a.

Capítulo 3

3. Peligros potenciales y zonas hidráulicamente vulnerables

3.1 Peligros potenciales

La NOM-027-SESH-2010 indica que para realizar la administración de la integridad, se identificarán los peligros potenciales para el ducto que le sean aplicables, con base en los tipos previstos de defectos y modos de falla citados abajo, así como otros peligros potenciales que se hayan observado durante esta etapa y que no se encuentren listados en la presente norma.

Los peligros potenciales se pueden agrupar en las siguientes nueve categorías, de acuerdo a su naturaleza y características de crecimiento como pueden ser de manera enunciativa los siguientes (Secretaría de Energía, 2010):

1.- Corrosión externa. Debe incluir la originada por influencia microbiológica (MIC), en caso de existir evidencia de la presencia de este fenómeno de corrosión.

2.- Corrosión interna. Debe incluir la originada por influencia microbiológica interna (MIC), en caso de existir evidencia de la presencia de este fenómeno de corrosión.

3.- Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC).

4.- Defectos de fabricación. Se deben considerar los defectos en la costura y en el metal base.

5.- Construcción. Incluir los defectos en la soldadura circunferencial, alineamiento y doblez por flexión o pandeo, daños en el recubrimiento, conexiones, dobleces, abolladuras, rasgaduras, o la combinación de éstos.

6.- Equipo. Se refiere a dispositivos diferentes a la tubería y a sus componentes. Debe incluir actuadores, válvulas de seccionamiento y aislamiento y trampas de diablos.

7.- Daños por terceros. Se deben incluir aquellos daños que provocan una falla.

8.- Operaciones incorrectas. Se deben considerar las operaciones incorrectas como resultado de procedimientos de operación incorrectos, seguir

procedimientos equivocadamente o no aplicar los procedimientos establecidos o la inexistencia de procedimientos para actividades críticas o peligrosas. También se consideran operaciones incorrectas aquellas operaciones no deseadas o no ordenadas en actuadores u otros componentes automáticos o controlados a distancia.

9.- Clima y fuerzas externas. Se deben incluir tormentas eléctricas, lluvia o inundaciones, huracanes, sismos, erosión y deslaves o movimiento del lecho marino.

3.2 Zonas hidráulicamente vulnerables

Una zona hidráulicamente vulnerable (ZHV), se considera una región que por su condición de integridad mecánica y por la presiones internas con las que opera puede representar un riesgo de ruptura o falla, La vulnerabilidad de una ZHV puede determinarse cuantitativamente a partir de la distancia relativa entre la envolvente de presiones seguras, la máxima presión de operación y la envolvente de presión máxima en el caso de un escenario de riesgo (Figura 1.2).

Un estudio detallado respecto a la metodología para obtener las zonas hidráulicamente vulnerables puede encontrarse en el trabajo de (García Lugo, 2012).

Como parte de la hipótesis de esta tesis se considera que los peligros potenciales deben ser evaluados en conjunto con las características de las zonas hidráulicamente vulnerables, bajo la idea de que cuando exista una correspondencia entre ellas el riesgo asociado a un peligro potencial se incrementa. En la siguiente sección se describe una metodología para identificar por una parte las ZHV, y por otra usar los parámetros que resultan del análisis de seguridad hidráulica en la ponderación de peligros potenciales. Cabe la pena señalar que el caso de estudio que se utiliza en esta tesis es hipotético y que el propósito del estudio busca identificar una posibilidad de mejora en la interpretación de la NOM-027.

3.3 Descripción general de la metodología

La metodología que se describe en esta sección cuenta con dos etapas generales. La primera corresponde a la identificación de las ZHV de acuerdo con la metodología extraída de trabajo de (García Lugo, 2012) y (Soto, et al., 2007a). La segunda consiste en la identificación de algunos peligros potenciales en los que se asocian algunas variables hidráulicas con fines de ponderación del riesgo asociado, siendo esta la principal contribución de este trabajo de tesis

3.3.1 Primera etapa. Identificación de ZHV

Para determinar las ZHV es necesario realizar una simulación del sistema en estado permanente y transitorio para la cual se requiere conocer tanto las condiciones de flujo, las condiciones de operación así como las especificaciones del fluido. Debe enfatizarse que el caso de estudio presenta particularidades debido a la presencia de sistemas de tubos en serie y en paralelo que dificultan el planteamiento de escenarios de simulación.

Adicionalmente es necesario calcular las envolventes de presiones seguras a partir de la información relacionada con los defectos de la tubería debidos a la corrosión, defectos constructivos, abolladuras y otros que puedan afectar la resistencia mecánica de la tubería. Cabe señalar que para esta tesis se considera solamente el efecto de corrosión galvánica, aunque la metodología es de carácter general y puede extenderse a otro tipo de defectos.

El procedimiento general para calcular un diagrama de energía como el que se presenta en la Figura 1.2 según Soto y Guaycochea. (Soto, et al., 2007a).

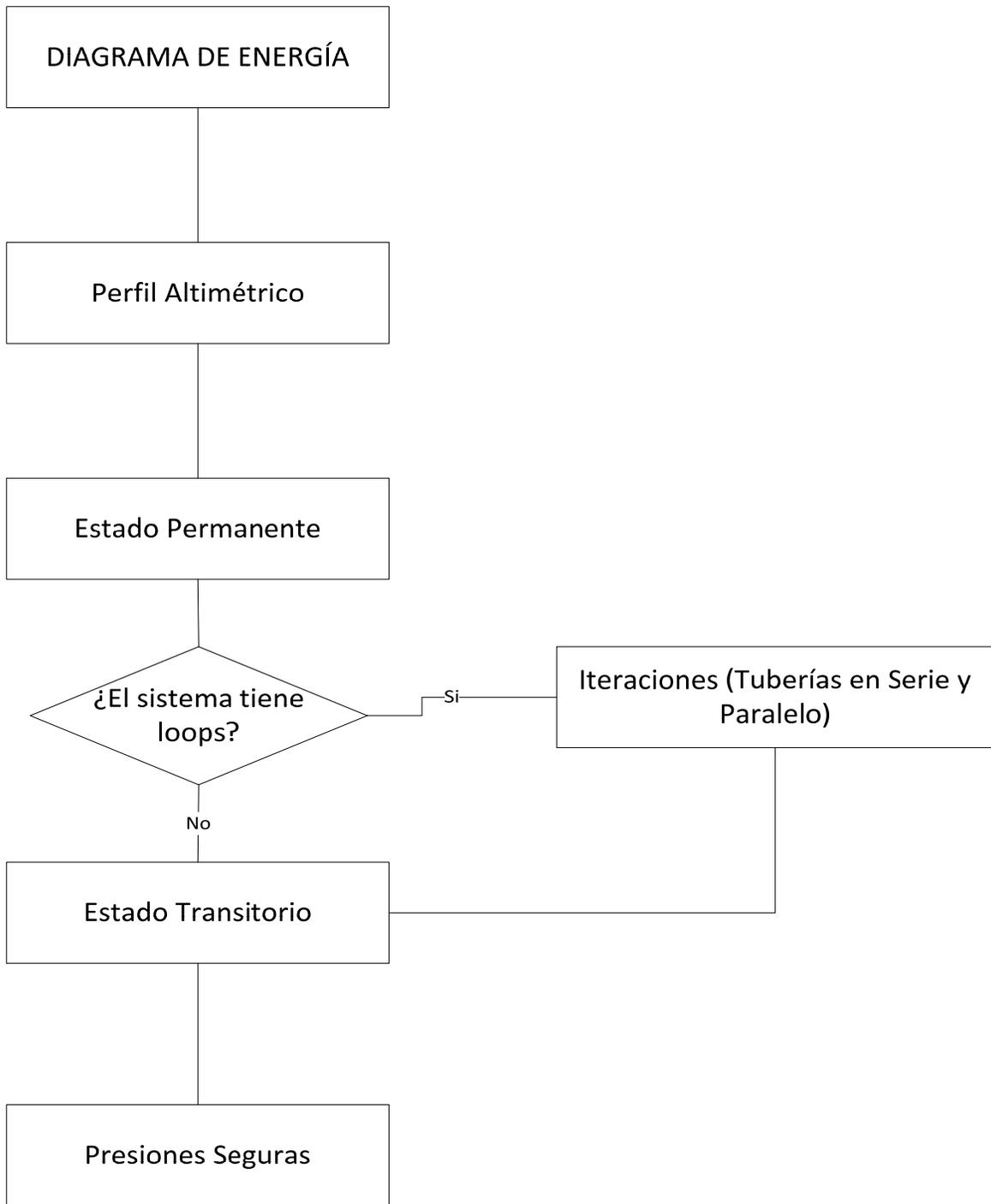


Figura 3.1. Diagrama general para calcular un diagrama de energía

3.3.2 Simulación en estado permanente

El estado permanente es cuando las propiedades del fluido no cambian con respecto al tiempo (son constantes). Es útil para conocer el comportamiento del sistema en un momento específico.

Para realizar la simulación en estado permanente se construirá un diagrama de energía a partir de la ecuación de energía (3.1).

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + H_f \quad (3.1)$$

Donde:

P_1 : Presión en el punto inicial [kg/m^2]

P_2 : Presión en el punto final [N/m^2]

γ : Peso específico [N/m^3]

Z_1 : ASNM en punto inicial [m]

Z_2 : ASNM en el punto final [m]

V_1 : Velocidad media de flujo en el punto inicial [m/s^2]

V_2 : Velocidad media de flujo en el punto final [m/s^2]

g : Fuerza de gravedad [m/s^2]

H_f : Pérdidas de energía por fricción [m]

A partir de la ecuación de energía se traza el diagrama de energía en estado permanente sabiendo que:

$\frac{P}{\gamma} + z =$ Línea de energía piezométrica (roja)

$\frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} =$ Línea de energía total (verde)

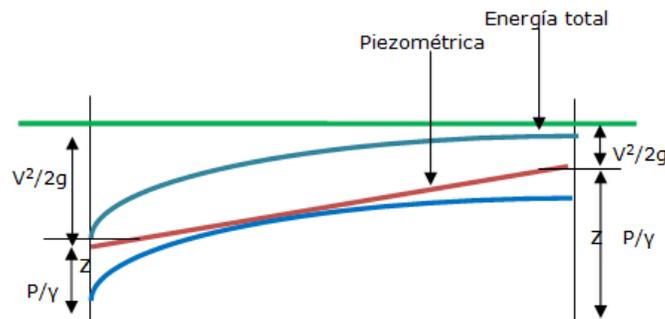


Figura 3.2. Ejemplificación de líneas de energía en un ducto

La simulación en estado permanente se realiza con la metodología que se muestra en la Figura 3.3.

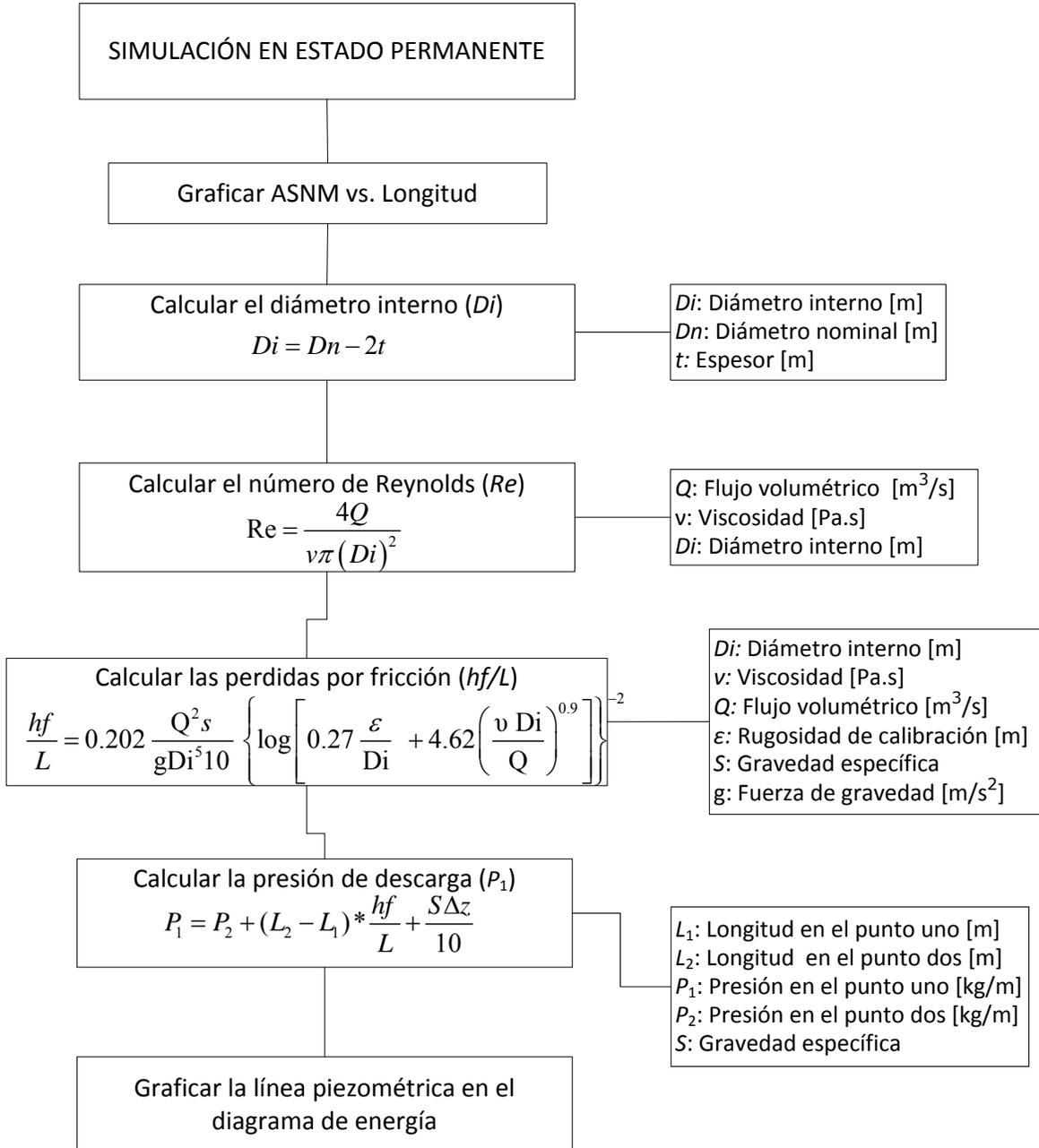


Figura 3.3. Diagrama para simular el estado permanente

Los cálculos obtenidos a partir del diagrama anterior, se muestran en la Tabla 3.1. La última columna muestra la MAOP (Presión de operación máxima permitida) con la cual se grafica la línea piezométrica en la Figura 3.4.

Tabla 3.1. Presión máxima de operación permitida

#	Estación	Longitud [km]	A.S.N.M. [m]	t [in]	d / t [%]	L [mm]	MAOP [kg/cm ²]
1	NUEVO TEAPA	0	34.05	0.312	34%	167.86	46.10
2		10+000	0.90	0.312	0%	0.00	45.80
3		20+000	2.57	0.312	0%	0.00	42.38
4		30+000	15.62	0.312	56%	79.58	37.95
5		40+000	25.71	0.312	18%	100.41	33.78
6		50+000	62.74	0.312	37%	82.35	27.19
7		60+00	89.27	0.312	8%	41.46	21.55
8		70+00	181.03	0.312	45%	28.79	10.07
9		80+00	59.37	0.312	59%	42.06	17.69
10		90+00	50.51	0.312	58%	113.65	15.22
11		100+00	23.24	0.312	0%	0.00	14.39
12		110+00	25.36	0.312	0%	0.00	10.93
13		120+00	36.36	0.312	20%	32.00	6.68
14	MAZUMIAPAN	120+47	42.20	0.312	0%	0.00	6.00
15	MAZUMIAPAN	120+47	42.20	0.312	51%	165.52	45.82
16		130+00	65.12	0.312	23%	36.59	40.65
17		140+00	44.63	0.312	0%	0.00	39.22
18		150+00	15.28	0.312	25%	66.43	38.58
19		160+00	5.27	0.312	0%	0.00	36.20
20		170+00	12.90	0.312	22%	130.09	32.25
21		180+00	53.87	0.312	36%	132.83	25.32
22		190+00	6.36	0.312	0%	0.00	26.30
23		200+00	13.80	0.312	30%	100.30	22.37
24		210+00	1.60	0.312	35%	166.35	20.19
25		220+00	13.11	0.312	18%	80.04	15.89
26		230+00	13.91	0.312	10%	128.75	12.55
27		240+00	12.12	0.312	0%	0.00	9.44
28		250+00	8.45	0.312	57%	115.85	6.50
29	EL TEJAR	250+97	10.50	0.312	20%	78.15	6.00
30	EL TEJAR	250+97	10.50	0.312	58%	35.08	46.96
31		260+00	72.80	0.312	4%	167.58	38.43
32		270+00	85.20	0.312	0%	0.00	34.05
33		280+00	5.00	0.312	34%	33.37	37.96
34		290+00	6.00	0.312	47%	165.56	34.61
35		300+00	9.40	0.312	0%	0.00	31.03
36		310+00	16.20	0.312	0%	0.00	27.16
37		320+00	5.50	0.312	6%	39.67	24.85
38		330+00	56.32	0.312	0%	0.00	17.04
39		340+00	22.14	0.312	0%	0.00	16.83
40		350+00	12.96	0.312	31%	33.91	14.38
41		360+00	13.19	0.312	47%	7.60	11.09

#	Estación	Longitud [km]	A.S.N.M. [m]	t [in]	d / t [%]	L [mm]	MAOP [kg/cm ²]
42	E. CARRANZA	364+10	55.07	0.312	40%	91.74	6.00
43	E. CARRANZA	364+10	55.07	0.312	0%	0.00	45.58
44		370+00	19.65	0.312	10%	48.83	46.82
45		380+00	13.49	0.312	26%	52.18	44.10
46		390+00	42.28	0.312	19%	2.46	38.26
47		400+00	10.31	0.312	34%	64.26	37.85
48		410+00	18.34	0.312	22%	131.96	33.86
49		420+00	111.00	0.312	28%	166.23	22.30
50		430+00	46.75	0.312	0%	0.00	24.79
51		440+00	71.53	0.312	46%	25.12	19.30
52		450+00	33.20	0.312	4%	108.13	19.46
53		460+00	55.82	0.312	0%	0.00	14.17
54		470+00	143.40	0.312	54%	60.80	3.05
55		480+00	73.60	0.312	41%	23.15	6.04
56	POZA RICA	484+20	58.72	0.312	12%	158.11	6.00
57	POZA RICA	484+20	55.15	0.312	52%	157.64	30.38
58		489+20	206.70	0.312	6%	134.30	16.00
59		499+20	106.70	0.312	0%	0.00	23.33
60		504+20	73.710	0.312	0%	0.00	25.47
61		509+20	76.16	0.312	0%	0.00	24.44
62		514+20	175.00	0.312	51%	131.98	14.78
63		519+20	52.20	0.312	55%	124.29	24.95
64		524+20	86.50	0.312	0%	0.00	21.07
65		529+20	62.90	0.312	0%	0.00	22.37
66		534+20	79.28	0.312	14%	58.77	20.10
67		539+20	25.79	0.312	0%	0.00	24.08
68		544+20	51.63	0.312	51%	34.52	20.95
69		549+20	70.44	0.312	0%	0.00	18.46
70		554+20	66.01	0.312	56%	4.67	18.04
71		559+20	71.88	0.312	19%	27.80	16.71
72		564+20	99.61	0.312	16%	76.03	13.41
73		569+20	198.30	0.312	0%	0.00	3.76
74		574+20	179.99	0.312	21%	31.03	4.59
75		579+20	157.71	0.312	18%	131.41	5.78
76		584+20	199.57	0.312	0%	0.00	1.22
77		589+20	77.99	0.312	49%	140.87	11.29
78	NARANJOS	593+20	51.60	0.312	0%	0.00	13.00
79	NARANJOS	593+20	51.60	0.312	59%	147.06	21.12
80		599+20	61.28	0.312	11%	46.61	19.28
81		604+20	51.36	0.312	29%	104.97	19.36
82		609+20	61.72	0.312	32%	71.69	17.62
83	3 HERMANOS	613+20	47.73	0.250	0%	0.00	18.22

#	Estación	Longitud [km]	A.S.N.M. [m]	t [in]	d / t [%]	L [mm]	MAOP [kg/cm ²]
83	3 HERMANOS	613+20	47.73	0.250	31%	70.56	18.22
84		619+20	10.81	0.250	0%	0.00	20.33
85		624+20	22.71	0.250	0%	0.00	18.26
86		629+20	25.33	0.250	0%	0.00	17.03
87		634+20	69.76	0.250	6%	79.86	12.05
88		639+20	58.24	0.25	0%	0.00	12.08
89		644+20	39.46	0.25	0%	0.00	12.76
90		649+20	29.64	0.25	0%	0.00	12.64
91		654+20	59.01	0.25	0%	0.00	9.01
92		659+20	36.39	0.25	0%	0.00	10.03
93		664+20	29.97	0.25	48%	89.15	9.61
94		669+20	22.14	0.25	20%	157.41	9.31
95		674+20	54.21	0.25	47%	10.07	5.44
96		679+20	51.03	0.25	43%	113.73	4.72
97		684+20	34.67	0.25	16%	15.40	5.18
98		689+20	32.93	0.25	18%	33.14	4.34
99		694+20	16.73	0.25	45%	15.51	4.79
100		699+20	53.15	0.25	53%	98.83	0.53
101	RIO PANUCO	705+20	2.38	0.25	40%	78.34	3.87
102	MADERO	709+20	3.16	0.25	0%	0.00	3.00
103	MADERO	709+20	10.11	0.5	12%	86.23	36.17
104		711+20	10.11	0.5	0%	0.00	35.22
105		713+20	10.58	0.5	25%	38.11	34.23
106		715+20	13.66	0.5	0%	0.00	33.01
107		717+70	7.70	0.5	0%	0.00	32.35
108		717+70	7.70	0.25	51%	123.10	32.35
109		719+20	9.65	0.25	16%	58.35	31.47
110		721+20	8.99	0.25	0%	0.00	30.58
111		723+20	11.80	0.25	0%	0.00	29.37
112		725+20	20.30	0.25	29%	41.56	27.66
113		727+20	10.74	0.25	34%	135.75	27.57
114		729+20	18.57	0.25	0%	0.00	25.92
115		731+20	16.40	0.25	0%	0.00	25.16
116		733+20	15.50	0.25	39%	154.38	24.29
117		735+20	21.25	0.25	10%	11.95	22.83
118		737+70	25.00	0.25	1%	109.90	21.31
119		737+70	25.00	0.5	0%	0.00	21.31
120		739+20	33.32	0.5	14%	107.65	19.85
121		741+20	33.38	0.5	20%	164.35	18.90
122		743+20	23.38	0.5	11%	134.00	18.84
123	Loop 1-Ini.	744+50	23.00	0.5	0%	0.00	18.26
124	Loop 1-Ini.	744+50	23.00	0.25	24%	61.73	18.26

#	Estación	Longitud [km]	A.S.N.M. [m]	t [in]	d / t [%]	L [mm]	MAOP [kg/cm ²]
125		745+20	27.14	0.25	0%	0.00	17.79
126		747+20	41.55	0.25	0%	0.00	16.23
127		749+20	40.81	0.25	57%	107.93	16.03
128		751+20	23.57	0.25	0%	0.00	17.30
129		753+20	24.75	0.25	26%	40.51	16.92
130		755+20	24.11	0.25	58%	155.85	16.70
131		757+20	27.62	0.25	59%	18.39	16.12
132		759+20	19.41	0.25	50%	57.13	16.58
133		761+20	19.80	0.25	0%	0.00	16.28
134		763+20	20.56	0.25	0%	0.00	15.94
135		765+20	24.32	0.25	0%	0.00	15.33
136		767+20	44.74	0.25	21%	166.97	13.23
137		769+20	51.78	0.25	0%	0.00	12.33
138		771+20	57.38	0.25	0%	0.00	11.55
139		773+20	45.98	0.25	15%	77.88	12.30
140		775+20	46.27	0.25	43%	59.88	12.00
141		777+20	48.74	0.25	38%	159.85	11.51
142		779+20	52.90	0.25	0%	0.00	10.87
143		781+20	57.04	0.25	6%	60.60	10.23
144		783+20	70.67	0.25	10%	108.64	8.73
145		785+20	78.00	0.25	8%	3.39	7.81
146		787+20	87.38	0.25	43%	16.02	6.69
147		789+20	85.07	0.25	11%	107.15	6.63
148		791+20	93.99	0.25	29%	29.19	5.56
149		793+20	106.70	0.25	0%	0.00	4.14
150	Punto Alto 1	795+20	118.89	0.25	21%	61.88	2.79
151		797+20	108.90	0.25	14%	19.28	3.41
152		799+20	103.28	0.25	0%	0.00	3.64
153	GONZALEZ	800+70	97.00	0.25	8%	13.51	4.00
154	GONZALEZ	800+70	97.00	0.344	0%	0.00	45.33
155		801+20	96.68	0.344	49%	4.80	45.12
156		803+20	93.96	0.344	12%	58.35	44.37
157		805+20	95.73	0.344	38%	27.01	43.23
158		807+20	101.90	0.344	35%	40.59	41.69
159		809+20	110.64	0.344	36%	73.09	39.92
160		811+20	104.64	0.344	26%	22.54	39.47
161		813+20	101.76	0.344	15%	115.36	38.74
162		815+20	94.25	0.344	27%	85.58	38.42
163		817+20	96.62	0.344	12%	53.51	37.22
164		819+20	96.34	0.344	24%	147.52	36.26
165		821+20	101.65	0.344	8%	111.75	34.80
166		823+20	105.10	0.344	35%	132.06	33.50

#	Estación	Longitud [km]	A.S.N.M. [m]	t [in]	d / t [%]	L [mm]	MAOP [kg/cm ²]
167		825+20	121.39	0.344	0%	0.00	31.06
168		827+20	132.45	0.344	10%	133.43	29.08
169		829+20	139.52	0.344	34%	68.24	27.46
170		831+20	125.58	0.344	26%	152.83	27.72
171		833+20	125.40	0.344	0%	0.00	26.75
172		835+20	132.13	0.344	32%	12.90	25.16
173		837+20	132.88	0.344	0%	0.00	24.11
174		839+20	135.63	0.344	0%	0.00	22.87
175		841+20	147.87	0.344	0%	0.00	20.79
176		843+20	164.08	0.344	0%	0.00	18.35
177		845+20	157.19	0.344	0%	0.00	17.98
178		847+20	151.37	0.344	0%	0.00	17.52
179		849+20	149.02	0.344	16%	85.30	16.74
180		851+20	162.14	0.344	0%	0.00	14.58
181		853+20	164.31	0.344	0%	0.00	13.40
182		855+20	224.54	0.344	0%	0.00	7.02
183	Punto Alto 2	857+20	260.23	0.344	1%	35.07	2.84
184		859+20	180.88	0.344	40%	68.46	8.95
185		861+20	195.62	0.344	12%	99.85	6.65
186	ZARAGOZA	861+50	190.00	0.344	15%	93.11	7.00
187	ZARAGOZA	861+50	190.00	0.344	0%	0.00	57.68
188		863+20	175.58	0.344	59%	136.37	58.14
189		865+20	178.88	0.344	0%	0.00	56.85
190		867+20	185.51	0.344	18%	82.55	55.27
191		869+20	188.67	0.344	10%	69.97	54.00
192		871+20	199.23	0.344	4%	93.30	52.07
193		873+20	200.84	0.344	0%	0.00	50.94
194		875+20	207.83	0.344	9%	52.59	49.33
195		877+20	226.53	0.344	18%	72.19	46.67
196		879+20	230.78	0.344	14%	146.50	45.30
197		881+20	220.79	0.344	17%	148.54	45.21
198		883+20	215.26	0.344	38%	83.14	44.71
199		885+20	211.80	0.344	0%	0.00	44.04
200		887+20	209.70	0.344	2%	63.66	43.24
201		889+20	202.71	0.344	0%	0.00	42.87
202		891+20	197.20	0.344	36%	139.82	42.38
203		893+20	193.90	0.344	0%	0.00	41.69
204		895+20	205.23	0.344	0%	0.00	39.69
205		897+20	220.55	0.344	25%	97.53	37.33
206		899+20	215.45	0.344	27%	117.40	36.80
207		901+20	210.07	0.344	0%	0.00	36.29
208		903+20	204.37	0.344	0%	0.00	35.82

#	Estación	Longitud [km]	A.S.N.M. [m]	t [in]	d / t [%]	L [mm]	MAOP [kg/cm ²]
209		905+20	211.80	0.344	43%	146.75	34.16
210		907+20	213.81	0.344	0%	0.00	33.00
211		909+20	229.67	0.344	2%	166.54	30.59
212		911+20	234.24	0.344	48%	97.11	29.19
213		913+20	242.83	0.344	0%	0.00	27.44
214		915+20	248.06	0.344	0%	0.00	25.98
215		917+20	245.10	0.344	53%	155.93	25.26
216		919+20	263.33	0.344	22%	11.95	22.64
217		921+20	271.78	0.344	0%	0.00	20.90
218		923+20	290.99	0.344	0%	0.00	18.19
219		925+20	298.64	0.344	0%	0.00	16.52
220		927+20	306.87	0.344	38%	46.64	14.80
221		929+20	313.21	0.344	39%	23.07	13.24
222		931+20	321.49	0.344	9%	71.06	11.51
223		933+20	324.67	0.344	14%	162.92	10.24
224		935+20	348.71	0.344	0%	0.00	7.10
225	Punto alto 3	937+20	354.95	0.344	22%	38.17	5.56
226		939+20	336.44	0.344	0%	0.00	6.23
227		941+20	318.62	0.344	38%	18.03	6.83
228		943+20	312.94	0.344	7%	61.85	6.35
229	VICTORIA	945+20	294.70	0.344	58%	36.80	7.00
230	VICTORIA	945+20	294.70	0.406	0%	0.00	57.01
231		947+20	282.40	0.406	19%	65.85	57.09
232		949+20	269.03	0.406	0%	0.00	57.28
233		951+20	263.24	0.406	1%	107.15	56.78
234		953+20	247.27	0.406	37%	88.58	57.20
235		955+20	247.76	0.406	4%	77.94	56.14
236		957+20	244.24	0.406	0%	0.00	55.45
237		959+20	240.14	0.406	6%	26.44	54.80
238		961+20	239.13	0.406	0%	0.00	53.88
239		963+20	221.83	0.406	0%	0.00	54.41
240		965+20	230.12	0.406	0%	0.00	52.66
241		967+20	221.60	0.406	12%	70.70	52.41
242		969+20	222.89	0.406	46%	117.99	51.28
243		971+20	220.45	0.406	41%	13.20	50.48
244		973+20	220.54	0.406	0%	0.00	49.46
245		975+20	223.44	0.406	48%	20.66	48.19
246		977+20	223.09	0.406	0%	0.00	47.21
247		979+20	223.77	0.406	56%	163.84	46.14
248		981+20	221.02	0.406	0%	0.00	45.37
249		983+20	230.09	0.406	0%	0.00	43.54
250		985+20	229.38	0.406	13%	146.89	42.59

#	Estación	Longitud [km]	A.S.N.M. [m]	t [in]	d / t [%]	L [mm]	MAOP [kg/cm ²]
251		987+20	217.97	0.406	0%	0.00	42.60
252		989+20	212.93	0.406	44%	120.64	42.04
253		991+20	215.85	0.406	0%	0.00	40.77
254		993+20	221.03	0.406	0%	0.00	39.29
255		995+20	223.41	0.406	0%	0.00	38.06
256		997+20	226.55	0.406	0%	0.00	36.77
257		999+20	230.68	0.406	2%	164.76	35.39
258		1001+20	285.41	0.406	53%	33.21	29.48
259		1003+20	254.72	0.406	34%	2.59	31.21
260		1005+20	282.95	0.406	11%	104.15	27.67
261		1007+20	267.95	0.406	23%	130.56	28.00
262		1009+20	255.85	0.406	0%	0.00	28.07
263		1011+20	254.91	0.406	48%	112.22	27.14
264	Loop 2 - Ini.	1013+20	260.84	0.406	0%	0.00	25.60
265	Loop 2 - Ini.	1013+20	260.84	0.344	38%	92.28	25.60
266		1015+20	260.06	0.344	37%	13.68	25.39
267		1017+20	264.86	0.344	0%	0.00	24.67
268		1019+20	266.96	0.344	19%	128.28	24.20
269		1021+20	278.50	0.344	2%	59.90	22.89
270		1023+20	283.85	0.344	21%	73.85	22.13
271		1025+20	395.94	0.344	0%	0.00	11.81
272		1027+20	309.92	0.344	41%	111.41	19.23
273		1029+20	320.36	0.344	14%	45.16	18.01
274		1031+20	318.82	0.344	0%	0.00	17.87
275		1033+20	323.27	0.344	0%	0.00	17.19
276		1035+20	334.19	0.344	1%	75.10	15.93
277		1037+20	343.83	0.344	17%	136.43	14.78
278		1039+20	354.63	0.344	0%	0.00	13.53
279	Punto alto 4	1041+20	471.85	0.344	41%	1.44	2.76
280		1043+20	406.76	0.344	23%	139.23	8.30
281		1045+20	401.45	0.344	0%	0.00	8.50
282		1047+20	368.12	0.344	36%	59.39	11.20
283		1049+20	348.87	0.344	52%	18.66	12.64
284		1051+20	326.68	0.344	0%	0.00	14.34
285		1053+20	315.16	0.344	0%	0.00	15.09
286		1055+20	311.26	0.344	0%	0.00	15.16
287		1057+20	308.39	0.344	0%	0.00	15.13
288		1059+20	325.46	0.344	51%	57.36	13.32
289		1061+20	353.24	0.344	0%	0.00	10.55
290		1063+20	363.73	0.344	20%	8.45	9.33
291		1065+20	360.50	0.344	30%	42.58	9.34
292		1067+20	377.54	0.344	6%	30.22	7.53

#	Estación	Longitud [km]	A.S.N.M. [m]	t [in]	d / t [%]	L [mm]	MAOP [kg/cm ²]
293		1069+20	364.28	0.344	6%	163.41	8.44
294		1071+20	361.82	0.344	32%	77.48	8.38
295		1073+20	349.43	0.344	43%	114.79	9.20
296		1075+20	352.58	0.344	14%	90.47	8.64
297		1077+20	348.75	0.344	24%	6.14	8.70
298		1079+20	361.38	0.344	43%	6.42	7.29
299	LINARES	1080+20	363.00	0.344	57%	66.62	7.00
300	LINARES	1080+20	363.00	0.312	33%	3.63	33.62
301		1081+20	364.77	0.312	32%	158.13	33.32
302		1083+20	375.10	0.312	0%	0.00	32.12
303		1085+20	390.39	0.312	12%	28.33	30.47
304		1087+20	401.08	0.312	4%	123.02	29.23
305		1089+20	441.42	0.312	0%	0.00	25.34
306		1091+20	444.07	0.312	10%	16.68	24.83
307		1093+20	446.35	0.312	32%	159.43	24.35
308		1095+20	463.70	0.312	59%	127.40	22.51
309		1097+20	473.74	0.312	14%	101.24	21.34
310		1099+20	472.03	0.312	31%	18.28	21.21
311		1101+20	480.85	0.312	17%	138.54	20.14
312		1103+20	502.38	0.312	54%	59.35	17.94
313		1105+20	505.67	0.312	0%	0.00	17.37
314	Punto alto 5	1107+20	526.84	0.312	55%	21.26	15.19
315		1109+20	520.74	0.312	35%	157.20	15.46
316		1111+20	510.10	0.312	0%	0.00	16.13
317		1113+20	475.84	0.312	0%	0.00	18.92
318		1115+20	473.66	0.312	0%	0.00	18.84
319		1117+20	464.44	0.312	0%	0.00	19.38
320		1119+20	436.40	0.312	52%	41.15	21.62
321		1121+20	409.11	0.312	27%	5.18	23.78
322	Loop 3 - Fin	1122+20	405.00	0.312	34%	48.06	24.01
323		1122+20	405.00	0.25	20%	50.01	24.01
324		1123+20	404.83	0.25	0%	0.00	23.55
325		1125+20	417.88	0.25	51%	23.44	21.43
326		1127+20	404.25	0.25	42%	61.95	21.70
327		1129+20	393.69	0.25	3%	21.23	21.70
328		1131+20	384.24	0.25	47%	13.12	21.59
329		1133+20	376.09	0.25	28%	127.33	21.37
330		1135+20	368.53	0.25	31%	121.27	21.10
331		1137+20	357.41	0.25	0%	0.00	21.14
332		1139+20	344.56	0.25	4%	136.29	21.34
333		1141+20	332.78	0.25	0%	0.00	21.45
334		1143+20	314.10	0.25	0%	0.00	22.17

#	Estación	Longitud [km]	A.S.N.M. [m]	t [in]	d / t [%]	L [mm]	MAOP [kg/cm ²]
335		1145+20	288.12	0.25	0%	0.00	23.55
336		1147+20	274.71	0.25	43%	42.57	23.80
337		1149+20	269.64	0.25	18%	164.24	23.30
338		1151+20	263.32	0.25	0%	0.00	22.92
339		1153+20	255.71	0.25	2%	31.57	22.65
340		1155+20	257.17	0.25	0%	0.00	21.57
341		1157+20	262.16	0.25	0%	0.00	20.17
342		1159+20	257.72	0.25	19%	25.52	19.62
343		1161+20	270.78	0.25	11%	92.14	17.50
344		1163+20	275.94	0.25	8%	93.55	16.09
345		1165+20	287.35	0.25	26%	33.97	14.12
346		1167+20	270.26	0.25	6%	73.68	14.70
347		1169+20	284.18	0.25	47%	137.96	12.50
348		1171+20	278.50	0.25	40%	151.69	12.06
349		1173+20	292.16	0.25	21%	91.21	9.89
350		1175+20	320.40	0.25	31%	76.97	6.41
351		1177+20	322.83	0.25	55%	128.91	5.25
352	CADEREYTA	1179+18	326.21	0.25	8%	110.37	4.00

La Figura 3.4 muestra la simulación del sistema de ductos en estado permanente. Se analizaron las presiones a la succión y a la descarga en cada estación. A partir de ahí se calculó la MAOP para cada punto en el sistema y se trazó la línea piezométrica (línea azul) en el diagrama de energía.

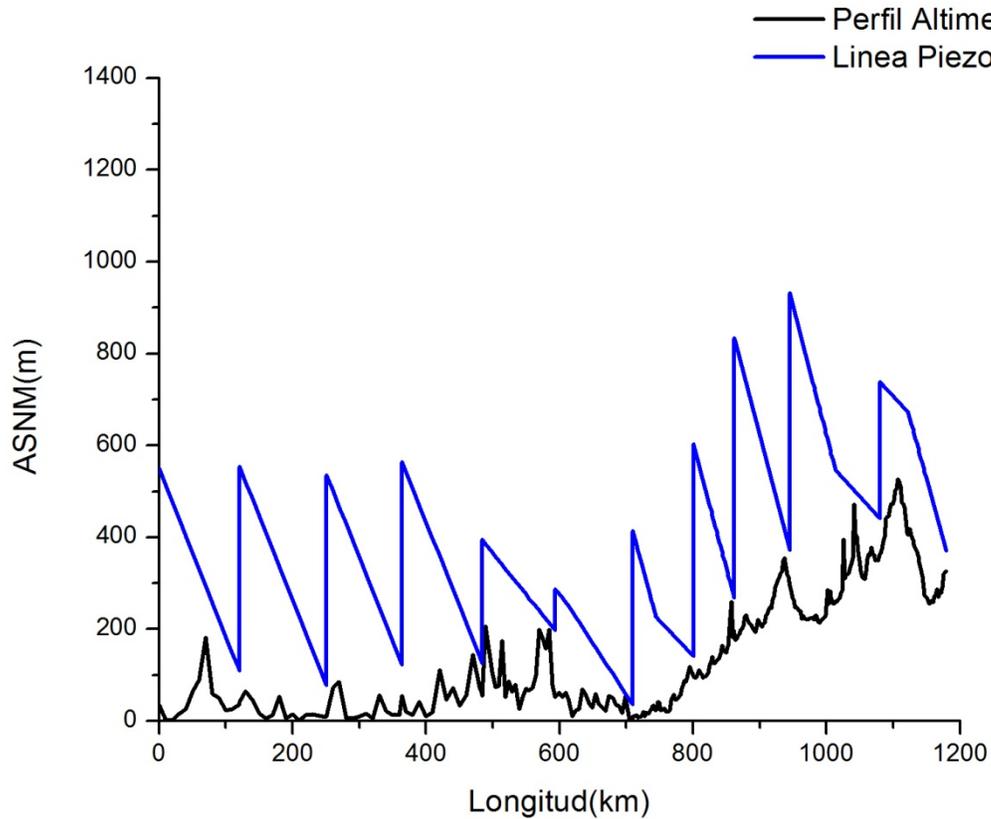


Figura 3.4. Diagrama de energía en estado permanente

3.3.3 Simulación de envolventes de máximas presiones

El estado transitorio se origina por variaciones del flujo volumétrico a lo largo del tiempo. En ductos a presión estas variaciones pueden ocasionar consecuencias graves, entre ellas el golpe de ariete, el cual se toma como base para esta simulación.

El golpe de ariete puede ser ocasionado por: cierre o apertura abrupta de válvulas, cierre intempestivo de loops, arranque o parada de bombas, fallo de energía eléctrica en las bombas, etc. Cuando ocurre este transitorio hidráulico el fluido se detiene abruptamente y las partículas del fluido que vienen atrás siguen empujando con la misma velocidad a las partículas de adelante, lo que ocasiona que la presión cambie de manera abrupta dentro de la tubería.

En un transitorio hidráulico se produce un incremento de tensiones en el material pudiendo ocasionar deformaciones o rupturas en el ducto y demás equipo, como puede ser daño de bridas, válvulas o uniones de la tubería. Si esto llegara a ocurrir, grandes cantidades de hidrocarburo podrían derramarse y ocasionar un grave accidente.

Para simular el estado transitorio en un diagrama de energía se calcula la intensidad de la onda de presión, representada con la línea roja de sobrepresión en el diagrama de energía. Los cálculos se realizan con la ecuación de Joukowsky (3.2).

$$\Delta p = \frac{aV}{g} \quad (3.2)$$

Donde:

V : Velocidad media del flujo [m/s]

a : Celeridad de onda [m/s]

g : Fuerza de gravedad [m/s²]

Para realizar la simulación en estado transitorio se muestra el siguiente diagrama (Figura 3.5).

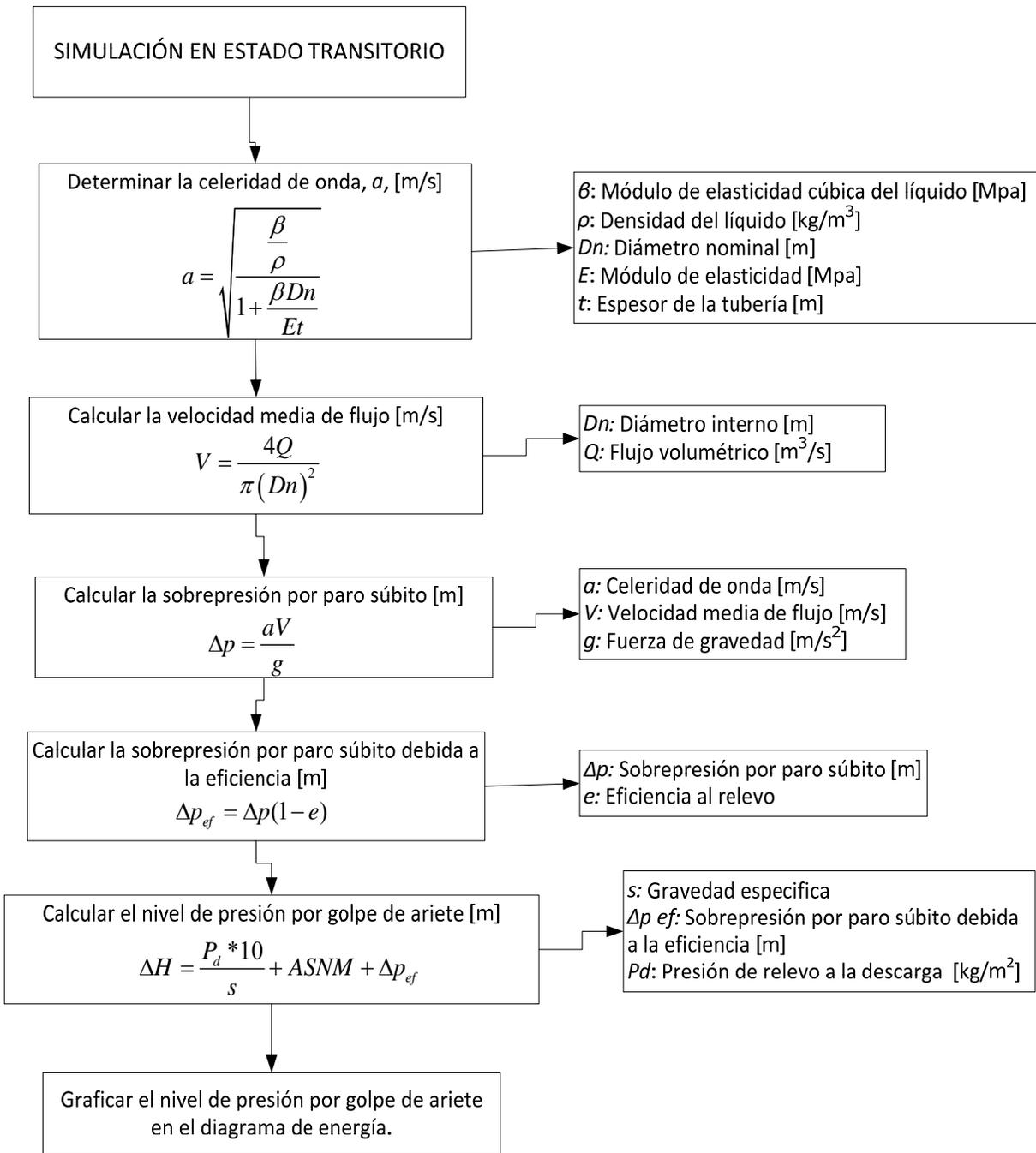


Figura 3.5. Diagrama para simulación en estado transitorio

Al seguir la metodología anterior se obtienen los cálculos mostrados en la Tabla 3.2, la presión de relevo a la descarga y el nivel de presión por golpe de ariete en cada estación del sistema.

Tabla 3.2 Nivel de sobrepresión por golpe de ariete

Estación	Elevación [msnm]	Posición [km]	Presión de relevo a la descarga [kg/cm ²]	Nivel de presión por golpe de ariete [m]
Estación 1	34.05	0+00	46.10	686.72
Estación 2	42.20	120+47	45.80	691.65
Estación 3	10.52	250+98	47.00	672.77
Estación 4	55.07	364+11	45.60	701.85
Estación 5	58.72	484+20	30.40	491.09
Estación 6	51.60	593+20	21.10	382.57
Estación 7	10.11	709+20	36.20	527.29
Estación 8	97.00	800+70	45.30	762.15
Estación 9	190.00	861+50	57.70	993.14
Estación 10	295.00	945+20	57.00	1059.28
Estación 11	363.00	1080+20	33.60	854.50
Estación 12	326.00	1179+19	na	854.50

Al graficar los datos anteriores obtenemos la línea de sobrepresión (línea roja), en el diagrama de energía (Figura 3.6) en estado transitorio. El diagrama muestra el comportamiento de la presión debida a un cierre brusco de la válvula, generando un transitorio hidráulico (golpe de ariete).

En el capítulo 4 se analizarán las posibles consecuencias que genera una sobrepresión (línea roja) con un valor mayor al de la presión segura (línea verde).

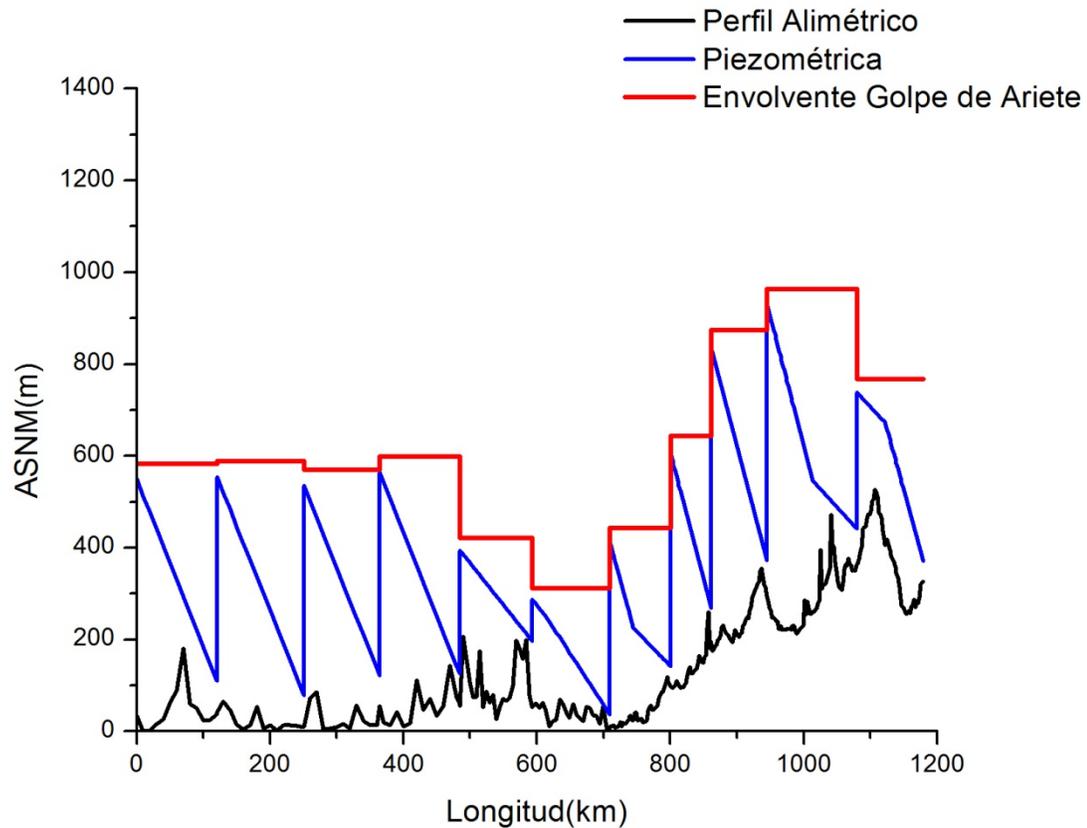


Figura 3.6. Diagrama de energía en estado transitorio

3.3.4 Cálculos para determinar el diámetro de los loops

Debido a que existen 4 loops (Figura 2.1), con diámetros distintos (Tabla 2.4), es necesario conocer la metodología para los cálculos en tuberías en serie y paralelo.

Además, debido a que existe una variación en los diámetros de los loops, se realiza una iteración para encontrar el flujo que circula por cada tubo y determinar así el diámetro equivalente. La metodología más detallada se encuentra en (Soto, et al., 2007a).

Primero se mostrará la metodología para tuberías en serie, después para tuberías en paralelo y finalmente las iteraciones para la combinación de ambas.

3.3.4.1 Tuberías en serie

Las tuberías en serie son dos o más tuberías alineadas con diferente diámetro y/o espesor (Figura 3.7).

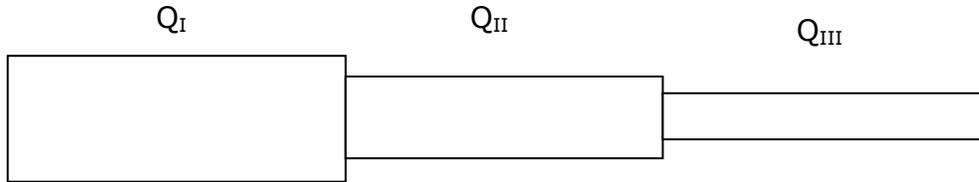


Figura 3.7. Arreglo de tuberías en serie con cambio de diámetro

La metodología para los cálculos en tuberías en serie se encuentra en la Figura 3.8.

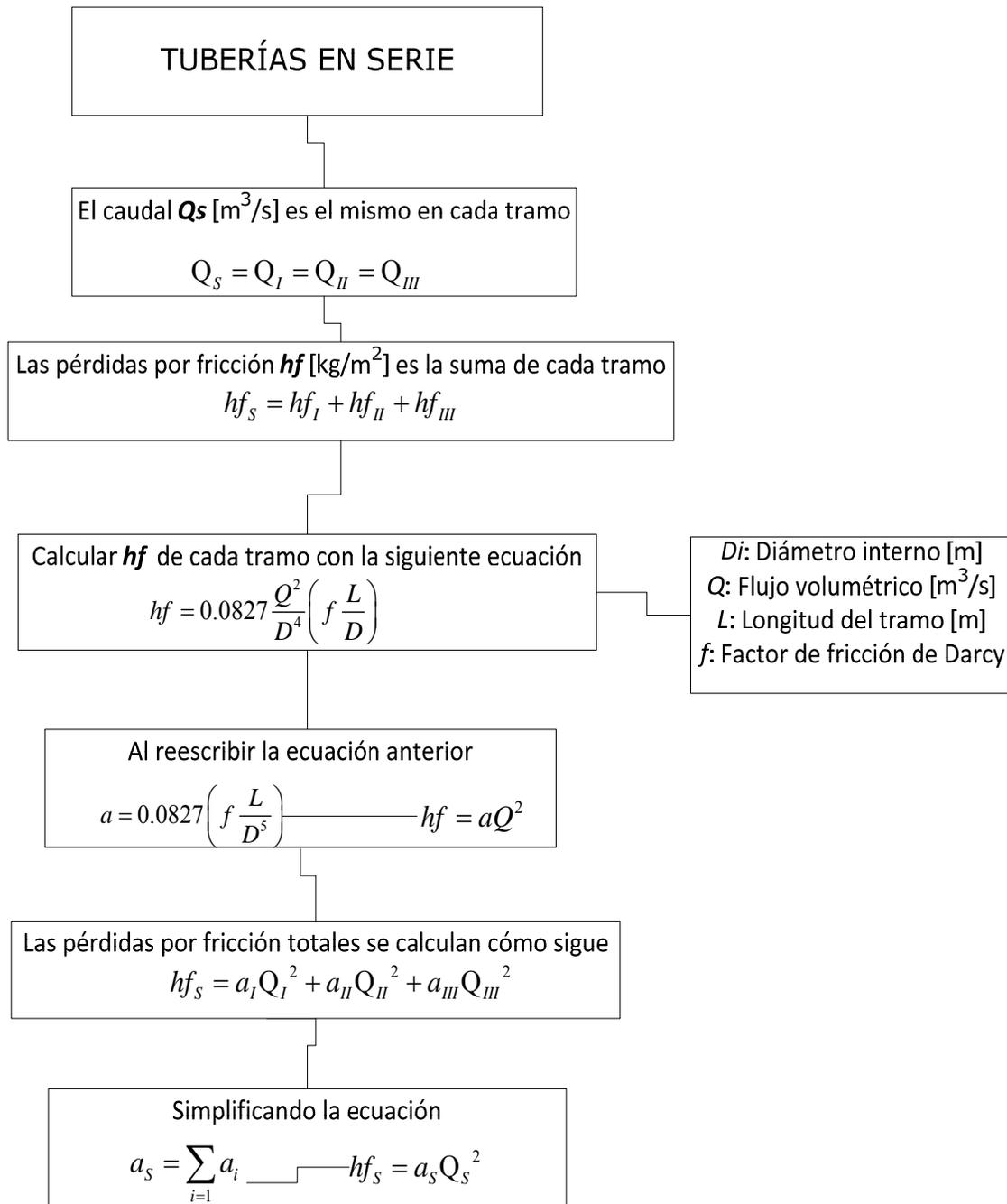


Figura 3.8. Diagrama para cálculos en tuberías en serie

3.3.4.2 Tuberías en paralelo

Las tuberías en paralelo son aquellas que se separan en algún punto en dos o más tubos y vuelven a unirse más adelante en otro punto. El caudal que circula al inicio se separa entre las tuberías siguientes (Figura 3.9).

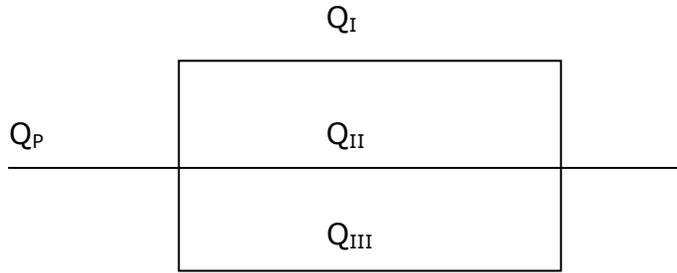


Figura 3.9. Arreglo de tuberías en paralelo

La metodología para los cálculos en tuberías en paralelo se encuentra en la Figura 3.10.

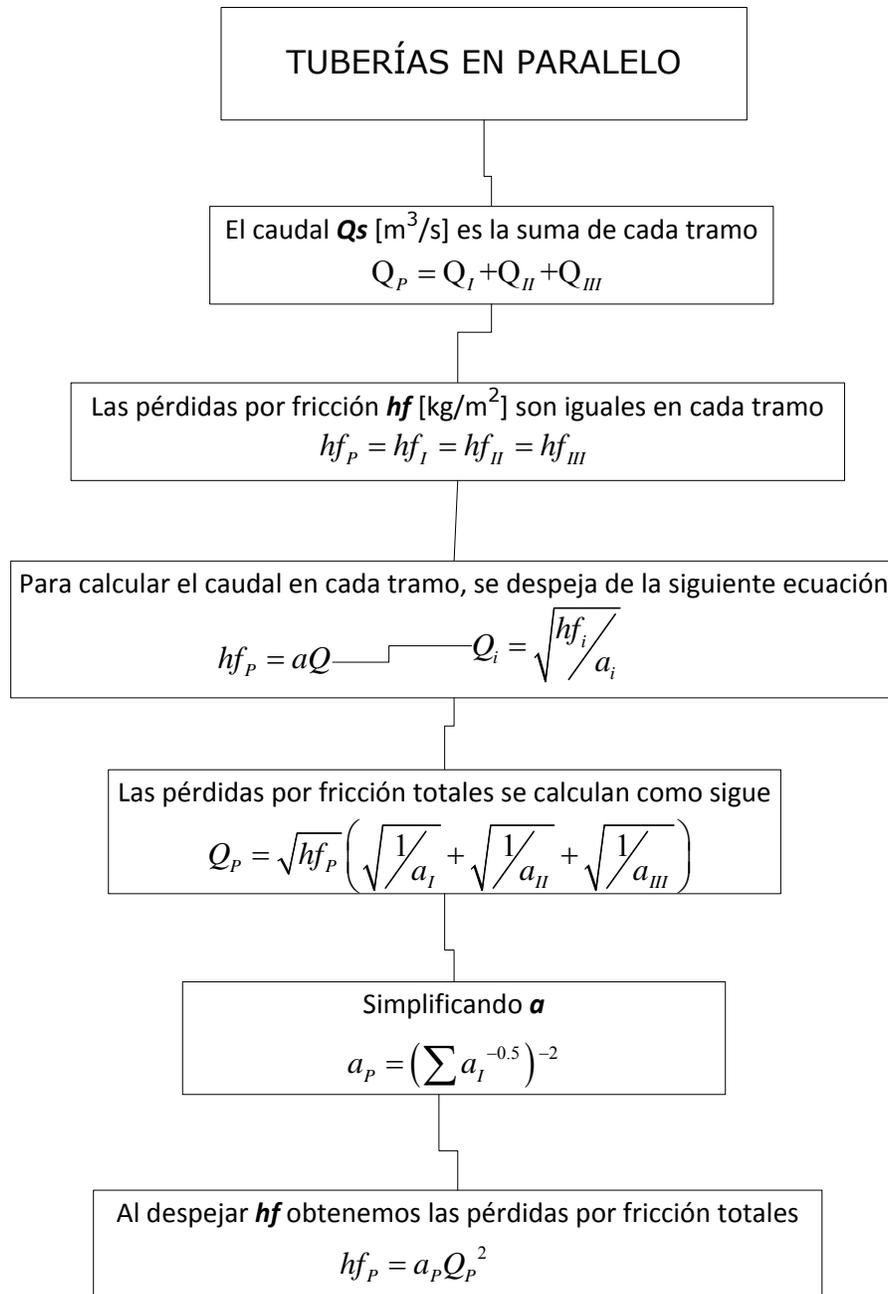


Figura 3.10. Diagrama para cálculos en tuberías en paralelo

3.3.5.3 Tuberías en serie y paralelo (combinadas)

Los loops encontrados se consideran como tuberías en paralelo. Sin embargo, debido a que en los loops existe un cambio de diámetro también se deben considerar las tuberías en serie.

La metodología que se presenta a continuación (Figura 3.11) muestra como se realizaron las iteraciones para determinar un diámetro equivalente y continuar con la simulación en estado transitorio.

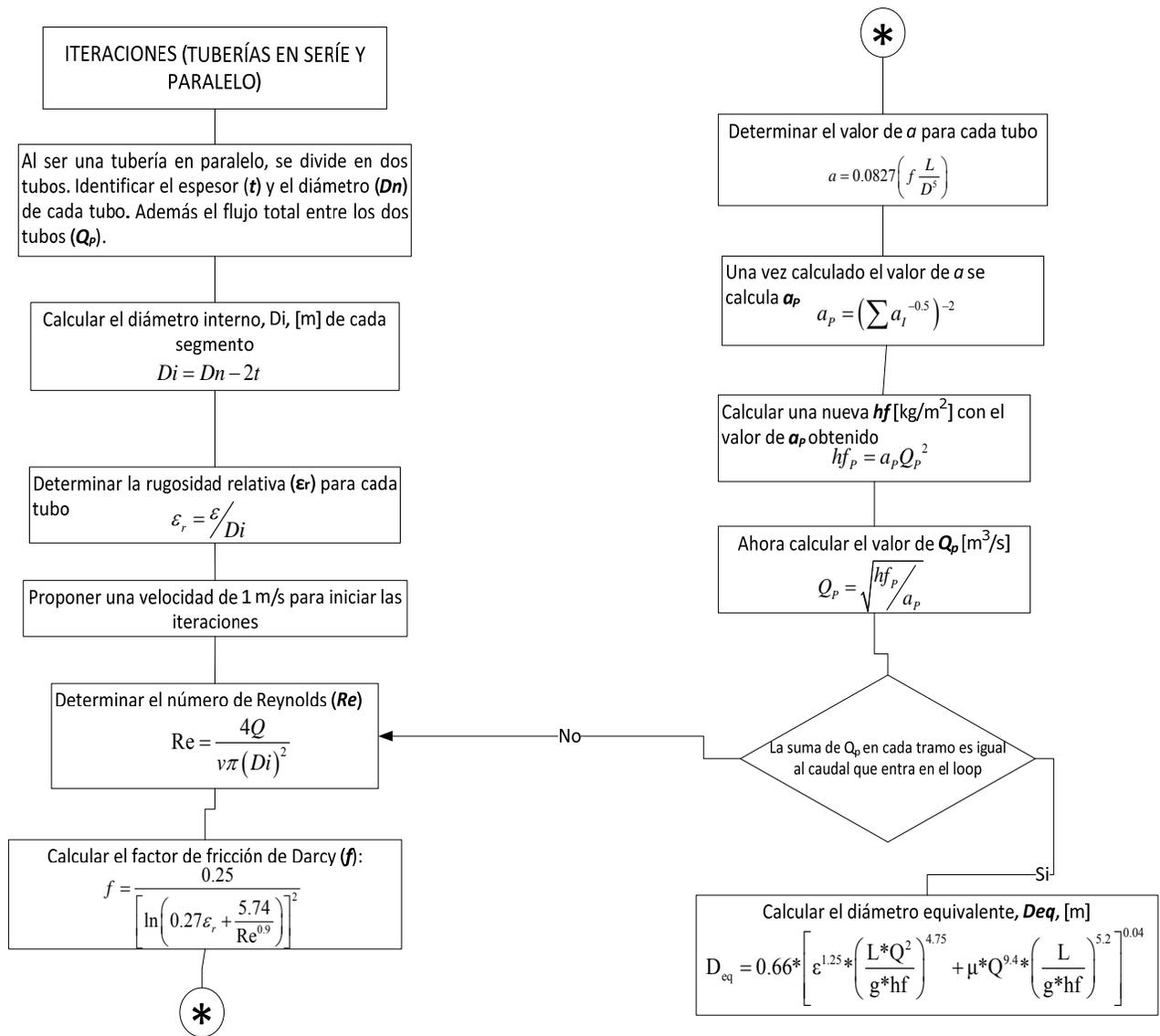


Figura 3.11 Diagrama para cálculos en tuberías en serie y paralelo

3.3.5 Cálculo de presiones seguras de operación

La presión segura de operación PS muestra en el diagrama de energía, la máxima presión que el tubo puede soportar después de varios años de uso o debido al desgaste que la corrosión le ha ocasionado.

En la Figura 3.12 se muestra la metodología que es utilizó para calcular la presión segura (Soto, G; Guaycochea, D, 2007b):

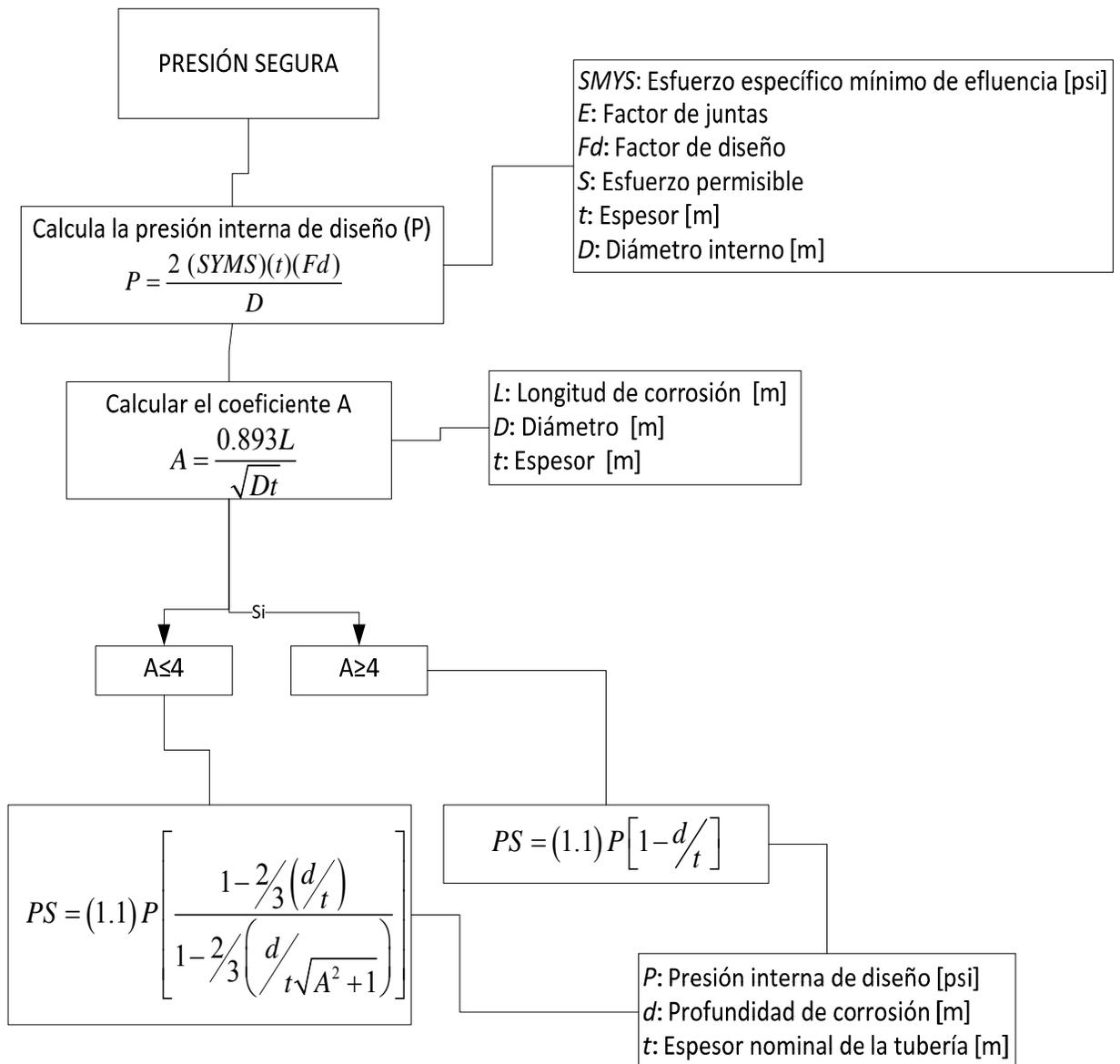


Figura 3.12. Diagrama para calcular presiones seguras

Notas:

1. La presión segura no puede exceder la presión de diseño
2. Si $PS \geq MAOP$. El tubo opera seguro con la MAOP proporcionada. Se mantiene el nivel de la MAOP.
3. Si $MAOP > P$. La MAOP excede la presión de diseño
4. Si $MAOP > PS$. Reducir la presión de operación de manera que no sobrepase la presión segura $PS \geq MAOP$

En la Figura 3.13 se puede observar la línea de presión segura (línea verde), la cual se obtiene al graficar la presión segura en cada punto del sistema. El análisis de los diagramas se realizará en el siguiente capítulo.

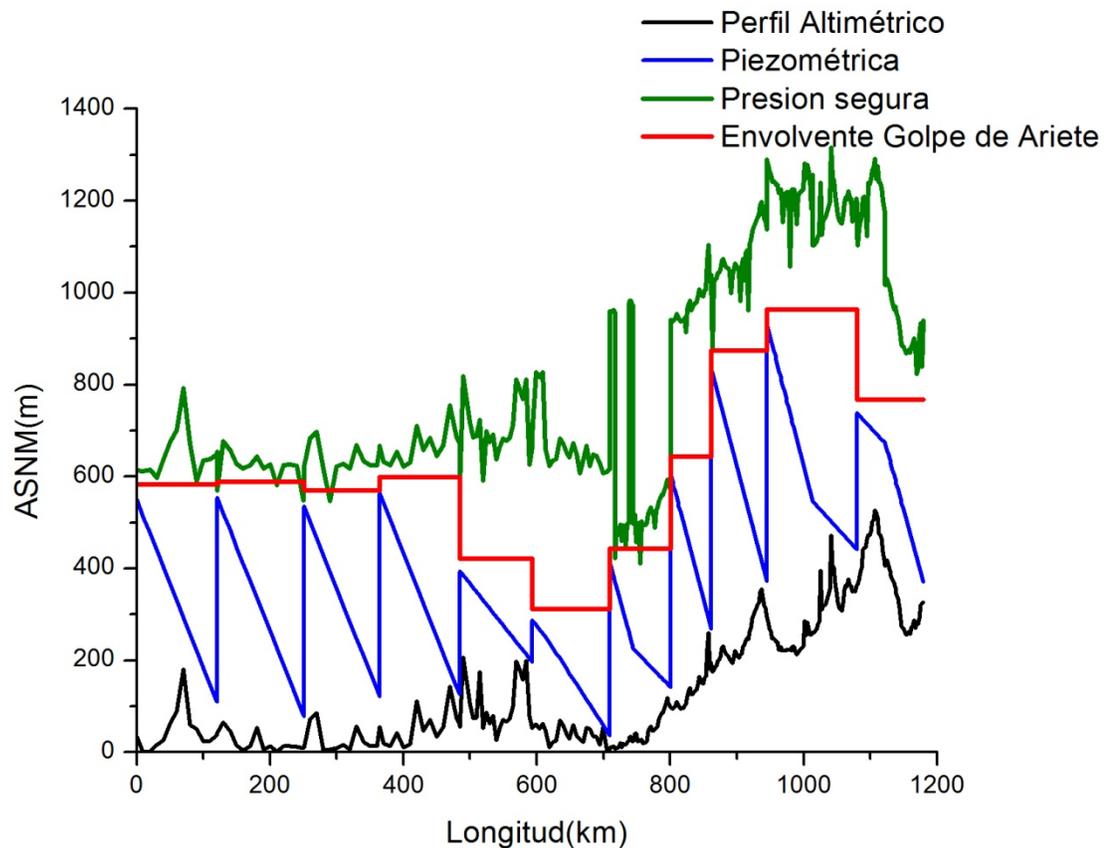


Figura 3.13. Diagrama de energía con presiones seguras de operación

3.4 Etapa dos. Ponderación de peligros potenciales incluyendo variables hidráulicas.

La ponderación de peligros potenciales se realiza para 4 categorías, de las 9 totales en las que se divide la Tabla 1.1. Los peligros potenciales que se analizarán son los siguientes:

1. Categoría 2. Corrosión interna (Corrosión interior)
2. Categoría 6. Equipo (Mal funcionamiento del equipo de relevo)
3. Categoría 8. Operaciones Incorrectas (Procedimientos de operación incorrectos o no aplicados)
4. Categoría 9. Clima y Fuerzas externas (Deslaves)

Las tablas que se muestran a continuación se elaboraron con el cálculo de las siguientes presiones:

La presión de operación (P_o) es la presión ideal a la cual el sistema opera si no es afectado por algún transitorio hidráulico. Se calcula con la ecuación de Presión máxima de operación permitida, MAOP. (Metodología mostrada en la Figura 3.2).

$$P_1 = P_2 + (L_2 - L_1) * \frac{hf}{L} + \frac{S\Delta z}{10} \quad (3.3)$$

La presión máxima ($P_{m\acute{a}x}$) es la presión que podría alcanzar el sistema si es afectado por un transitorio hidráulico, por ejemplo, golpe de ariete. Se calcula con la siguiente relación (Para el cálculo de ΔH ver Figura 3.4).

$$P_{m\acute{a}x} = ASN M - \Delta H \quad (3.4)$$

La presión segura (PS) es la presión que, de acuerdo al PAID, la tubería puede soportar debido al desgaste por corrosión. Se calcula con la ecuación de Presión segura (Ver metodología en Figura 3.11).

Si $A \leq 4$, la calcularemos de la siguiente forma:

$$PS = (1.1)P \left[\frac{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t} \right)}{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t \sqrt{A^2 + 1}} \right)} \right] \quad (3.5)$$

Si $A > 4$, la calcularemos de la siguiente forma:

$$PS = (1.1)P \left[1 - \frac{d}{t} \right] \quad (3.6)$$

3.4.1 Peligros potenciales: Categoría 2 (Corrosión interior).

En la Tabla 3.3 se observan 12 puntos, los cuales son clasificados como "Precaución" y "Atención inmediata". Se propuso un escenario con una eficiencia de relevo de 80%.

Tabla 3.3 Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
1	Precaución	30+00	15.62	37.95	50.83	52.07	56	79.58
2	Atención inmediata	90+00	50.51	15.22	47.70	48.31	58	113.65
3	Atención inmediata	120+44	42.20	45.82	48.89	47.24	51	165.52
4	Atención inmediata	210+00	1.60	20.19	51.43	51.90	35	166.35
5	Atención inmediata	250+00	8.45	6.50	50.22	48.35	57	115.85
6	Atención inmediata	290+00	6.04	34.61	50.44	48.37	47	165.56
7	Atención inmediata	717+70	7.70	32.35	38.91	37.10	51	123.10
8	Precaución	727+20	10.74	27.57	38.64	40.30	34	135.75
9	Atención inmediata	733+20	15.50	24.29	38.21	38.67	39	154.38
10	Precaución	749+20	40.81	16.03	35.95	37.29	57	107.93
11	Atención inmediata	755+20	24.11	16.70	37.44	34.71	58	155.85
12	Atención inmediata	863+20	175.50	58.14	62.52	63.02	59	136.37

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm². ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y P_s es menor a 1 kg/cm².

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 80%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

En la Tabla 3.4 se observan 98 puntos, los cuales son clasificados como "Precaución" y "Atención inmediata". Se propuso un escenario con posible fallo de válvulas y por lo tanto una eficiencia de relevo de 20%. Al disminuir la eficiencia de relevo los puntos de alto riesgo aumentan considerablemente. Estos puntos requieren atención en un lapso no mayor a 5 días.

Tabla 3.4 Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
1	Atención inmediata	0+00	34.05	46.10	58.41	51.87	34%	167.86
2	Atención inmediata	10+00	0.90	45.80	61.38	54.75	0%	0
3	Atención inmediata	20+00	2.57	42.38	61.23	54.75	0%	0
4	Atención inmediata	30+00	15.60	37.95	60.06	52.07	56%	79.58
5	Atención inmediata	40+00	25.70	33.78	59.16	54.75	18%	100.41
6	Atención inmediata	50+00	62.74	27.19	55.85	54.75	37%	82.35
7	Precaución	60+00	89.27	21.55	53.47	54.75	8%	41.46
8	Atención inmediata	80+00	59.37	17.69	56.15	54.75	59%	42.06
9	Atención inmediata	90+00	50.51	15.22	56.94	48.31	58%	113.65
10	Atención inmediata	100+00	23.24	14.39	59.38	54.75	0%	0
11	Atención inmediata	110+00	25.36	10.93	59.19	54.75	0%	0
12	Atención inmediata	120+00	36.36	6.68	58.21	54.75	20%	32.00
13	Atención inmediata	120+44	42.20	6.00	58.13	54.75	0%	0
14	Atención inmediata	120+47	42.20	45.82	58.13	47.24	51%	165.52
15	Atención inmediata	130+00	65.12	40.65	56.07	54.75	23%	36.59
16	Atención inmediata	140+00	44.63	39.22	57.91	54.75	0%	0
17	Atención inmediata	150+00	15.28	38.58	60.54	54.75	25%	66.43
18	Atención inmediata	160+00	5.27	36.20	61.43	54.75	0%	148.72
19	Atención inmediata	170+00	12.90	32.25	60.74	54.75	22%	130.09
20	Atención inmediata	180+00	53.87	25.32	57.08	52.72	36%	132.83
21	Atención inmediata	190+00	6.36	26.30	61.33	54.75	0%	0
22	Atención inmediata	200+00	13.80	22.37	60.67	54.75	30%	100.30

#	² Categoría	Posición [km]	ASNM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
23	Atención inmediata	210+00	1.60	20.19	61.76	51.90	35%	166.35
24	Atención inmediata	220+00	13.10	15.89	60.73	54.75	18%	80.04
25	Atención inmediata	230+00	13.91	12.55	60.66	54.75	10%	128.75
26	Atención inmediata	240+00	12.12	9.44	60.82	54.75	0%	0
27	Atención inmediata	250+00	8.45	6.50	61.15	48.35	57%	115.85
28	Atención inmediata	250+97	10.50	6.00	59.27	54.75	20%	78.15
29	Atención inmediata	250+97	10.52	46.96	59.27	54.75	58%	35.08
30	Precaución	260+00	72.88	38.43	53.69	54.75	4%	167.58
31	Atención inmediata	280+00	5.07	37.96	59.76	54.75	34%	33.37
32	Atención inmediata	290+00	6.04	34.61	59.67	48.37	47%	165.56
33	Atención inmediata	300+00	9.48	31.03	59.36	54.75	0%	0
34	Atención inmediata	310+00	16.20	27.16	58.76	54.75	0%	0
35	Atención inmediata	320+00	5.50	24.85	59.72	54.75	6%	39.67
36	Atención inmediata	330+000	56.30	17.04	55.17	54.75	0%	0
37	Atención inmediata	340+00	22.14	16.83	58.23	54.75	0%	0
38	Atención inmediata	350+00	12.96	14.38	59.05	54.75	31%	33.91
39	Atención inmediata	360+00	13.19	11.09	59.03	54.75	47%	7.60
40	Atención inmediata	364+10	55.07	6.00	57.89	54.18	40%	91.74
41	Atención inmediata	364+10	55.07	45.58	57.89	54.75	0%	0
42	Atención inmediata	370+00	19.65	46.82	61.06	54.75	10%	48.83
43	Atención inmediata	380+00	13.49	44.10	61.61	54.75	26%	52.18
44	Atención inmediata	390+00	42.28	38.26	59.03	54.75	19%	2.46
45	Atención inmediata	400+00	10.31	37.85	61.89	54.75	34%	64.26
46	Atención inmediata	410+00	18.34	33.86	61.17	54.75	22%	131.96
47	Atención inmediata	420+00	111.00	22.30	52.88	53.65	28%	166.23
48	Atención inmediata	430+00	46.70	24.79	58.63	54.75	0%	0
49	Atención inmediata	440+00	71.50	19.30	56.41	54.75	46%	25.12
50	Atención inmediata	450+00	33.20	19.46	59.84	54.75	4%	108.13
51	Atención inmediata	460+00	55.82	14.17	57.82	54.75	0%	0

#	² Categoría	Posición [km]	ASNM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
52	Atención inmediata	480+00	73.60	6.04	56.23	54.75	41%	23.15
53	Atención inmediata	484+20	58.72	6.00	38.70	54.75	12%	158.11
54	Atención inmediata	717+70	7.70	32.35	46.50	37.10	51%	123.10
55	Atención inmediata	719+20	9.65	31.47	46.33	42.47	16%	58.35
56	Atención inmediata	721+20	8.99	30.58	46.39	42.47	0%	0
57	Atención inmediata	723+20	11.80	29.37	46.13	42.47	0%	0
58	Atención inmediata	725+20	20.30	27.66	45.38	42.47	29%	41.56
59	Atención inmediata	727+20	10.74	27.57	46.23	40.30	34%	135.75
60	Atención inmediata	729+20	18.57	25.92	45.53	42.47	0%	0
61	Atención inmediata	731+20	16.40	25.16	45.72	42.47	0%	0
62	Atención inmediata	733+20	15.50	24.29	45.80	38.67	39%	154.38
63	Atención inmediata	735+20	21.25	22.83	45.29	42.47	10%	11.95
64	Atención inmediata	737+70	25.00	21.31	44.95	42.47	1%	109.90
65	Atención inmediata	744+50	23.00	18.26	45.13	42.47	24%	61.73
66	Atención inmediata	745+20	27.14	17.79	44.76	42.47	0%	0
67	Atención inmediata	747+20	41.55	16.23	43.47	42.47	0%	0
68	Atención inmediata	749+20	40.81	16.03	43.54	37.29	57%	107.93
69	Atención inmediata	751+20	23.57	17.30	45.08	42.47	0%	0
70	Atención inmediata	753+20	24.75	16.92	44.98	42.47	26%	40.51
71	Atención inmediata	755+20	24.11	16.70	45.03	34.71	58%	155.85
72	Atención inmediata	757+20	27.62	16.12	44.72	42.47	59%	18.39
73	Atención inmediata	759+20	19.41	16.58	45.45	42.47	50%	57.13
74	Atención inmediata	761+20	19.80	16.28	45.42	42.47	0%	0
75	Atención inmediata	763+20	20.56	15.94	45.35	42.47	0%	0
76	Atención inmediata	765+20	24.32	15.33	45.02	42.47	0%	0
77	Atención inmediata	767+20	44.74	13.23	43.19	42.47	21%	166.97
78	Atención inmediata	769+20	51.78	12.33	42.56	42.47	0%	0
79	Atención inmediata	771+20	57.38	11.55	42.06	42.47	0%	0
80	Atención inmediata	773+20	45.98	12.30	43.08	42.47	15%	77.88

#	² Categoría	Posición [km]	ASNM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
81	Atención inmediata	775+20	46.27	12.00	43.05	42.47	43%	59.88
82	Atención inmediata	777+20	48.74	11.51	42.83	39.39	38%	159.85
83	Atención inmediata	779+20	52.90	10.87	42.46	42.47	0%	0
84	Atención inmediata	781+20	57.04	10.23	42.09	42.47	6%	60.60
85	Precaución	783+20	70.67	8.73	40.87	42.47	10%	108.64
86	Atención inmediata	863+20	175.50	58.14	73.17	63.02	59%	136.37
87	Atención inmediata	891+20	197.20	42.38	71.24	71.82	36%	139.82
88	Atención inmediata	905+2	211.80	34.16	69.93	68.95	43%	146.75
89	Atención inmediata	917+20	245.10	25.26	66.95	64.15	53%	155.93
90	Atención inmediata	979+20	223.77	46.14	74.78	74.54	56%	163.84
91	Precaución	1151+20	263.32	14.34	52.91	75.46	0%	0
92	Precaución	1153+20	255.71	15.09	45.81	75.46	0%	0
93	Precaución	1155+20	257.17	15.16	53.46	75.46	0%	0
94	Precaución	1157+20	262.16	15.13	53.01	75.46	0%	0
95	Precaución	1159+20	257.72	13.32	53.41	75.46	51%	57.36
96	Atención inmediata	1169+20	284.18	12.50	51.04	48.35	6%	163.41
97	Atención inmediata	1171+20	278.50	12.06	51.55	49.70	32%	77.48
98	Atención inmediata	1177+20	322.83	5.25	47.58	46.23	24%	6.14

¹ Galvánica.² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm². ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es menor a 1 kg/cm².³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 20%.⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

En las tablas siguientes se muestran los puntos con clasificación “Bajo riesgo” según el análisis hidráulico. Se clasificaron de acuerdo al porcentaje de corrosión en el tubo con base en la relación que existe entre la profundidad de corrosión (d) y el espesor (t) de la siguiente manera:

1. 55% a 60%
2. 50% a 55%
3. 45% a 50%
4. 40% a 45%
5. 35% a 40%
6. 30% a 35%

De la Tabla 3.5 a la 3.10 el cálculo se realizó para una eficiencia de relevo del 80%. Los siguientes puntos requieren atención en un lapso no mayor a 180 días.

Tabla 3.5 Corrosión interna de bajo riesgo $55\% < d/t < 60\%$
Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNMM [m]	P_o [kg/cm ²]	³ P_{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
1	Bajo riesgo	8+00	59.37	17.69	46.91	54.75	59%	42.06
2	Bajo riesgo	25+.95	10.52	46.96	50.03	54.75	58%	35.08
3	Bajo riesgo	519+20	52.27	24.95	33.03	48.26	55%	124.29
4	Bajo riesgo	554+20	66.01	18.04	31.80	54.75	56%	4.67
5	Bajo riesgo	593+20	51.60	21.12	23.24	57.29	59%	147.06
6	Bajo riesgo	757+20	27.62	16.12	37.13	42.47	59%	18.39
7	Bajo riesgo	945+20	294.70	7.00	59.88	75.46	58%	36.80
8	Bajo riesgo	979+20	223.77	46.14	66.23	74.54	56%	163.84
9	Bajo riesgo	1080+20	363.00	7.00	36.21	74.37	57%	66.62
10	Bajo riesgo	1095+20	463.70	22.51	27.19	59.02	59%	127.40
11	Bajo riesgo	1107+20	526.84	15.19	21.54	68.44	55%	21.26
12	Bajo riesgo	1177+20	322.83	5.25	39.80	46.23	55%	128.91

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm². ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es menor a 1 kg/cm².

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 80%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

Tabla 3.6 Corrosión interna de bajo riesgo $50\% < d/t < 55\%$
Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNMM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
1	Bajo riesgo	470+00	143.49	3.05	40.74	54.65	54%	60.80
2	Bajo riesgo	484+20	55.15	30.38	32.77	47.38	52%	157.64
3	Bajo riesgo	514+20	175.05	14.78	22.04	48.99	51%	131.98
4	Bajo riesgo	544+20	51.63	20.95	33.09	54.75	51%	34.52
5	Bajo riesgo	699+20	53.15	0.53	23.11	49.66	53%	98.83
6	Bajo riesgo	759+20	19.41	16.58	37.8	42.47	50%	57.13
7	Bajo riesgo	917+20	245.10	25.26	56.30	64.15	53%	155.93
8	Bajo riesgo	1001+20	285.41	29.48	60.71	89.06	53%	33.21
9	Bajo riesgo	1049+20	348.87	12.64	55.03	75.46	52%	18.66
10	Bajo riesgo	1059+20	325.46	13.32	57.13	75.46	51%	57.36
11	Bajo riesgo	1103+20	502.38	17.94	23.73	68.44	54%	59.35
12	Bajo riesgo	1119+20	436.40	21.62	29.64	68.44	52%	41.15
13	Bajo riesgo	1125+20	417.88	21.43	31.29	54.84	51%	23.44

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm². ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es menor a 1 kg/cm².

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 80%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

Tabla 3.7 Corrosión interna de bajo riesgo $45\% < d/t < 50\%$
Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNMM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
1	Bajo riesgo	70+00	181.03	10.07	36.02	54.75	45%	28.79
2	Bajo riesgo	360+00	13.19	11.09	49.80	54.75	47%	7.60
3	Bajo riesgo	440+00	71.53	19.30	47.18	54.75	46%	25.12
4	Bajo riesgo	589+20	77.99	11.29	30.73	49.06	49%	140.87

#	² Categoría	Posición [km]	ASNMM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
5	Bajo riesgo	664+20	29.97	9.61	25.18	51.70	48%	89.15
6	Bajo riesgo	674+20	54.21	5.44	23.01	54.84	47%	10.07
7	Bajo riesgo	694+20	16.73	4.79	26.36	54.84	45%	15.51
8	Bajo riesgo	801+20	96.68	45.12	30.95	75.46	49%	4.80
9	Bajo riesgo	911+20	234.24	29.19	57.27	71.00	48%	97.11
10	Bajo riesgo	969+20	222.89	51.28	66.31	83.36	46%	117.99
11	Bajo riesgo	975+20	223.44	48.19	66.26	89.06	48%	20.66
12	Bajo riesgo	101+.20	254.91	27.14	63.44	83.03	48%	112.22
13	Bajo riesgo	113+.20	384.24	21.59	34.30	54.84	47%	13.12
14	Bajo riesgo	116+.20	284.18	12.50	43.26	48.35	47%	137.96

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm². ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es menor a 1 kg/cm².

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 80%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

Tabla 3.8 Corrosión interna de bajo riesgo 40% < d/t < 45%
Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNMM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
1	Bajo riesgo	364+10	55.07	6.00	48.65	54.18	40%	91.74
2	Bajo riesgo	480+00	73.60	6.04	46.99	54.75	41%	23.15
3	Bajo riesgo	679+20	51.03	4.72	23.29	51.19	43%	113.73
4	Bajo riesgo	705+20	2.38	3.87	27.65	54.41	40%	78.34
5	Bajo riesgo	775+20	46.27	12.00	35.46	42.47	43%	59.88
6	Bajo riesgo	787+20	87.38	6.69	31.78	42.47	43%	16.02
7	Bajo riesgo	859+20	180.88	8.95	41.37	75.46	40%	68.46
8	Bajo riesgo	905+20	211.80	34.16	59.28	68.95	43%	146.75
9	Bajo riesgo	971+20	220.45	50.48	66.52	89.06	41%	13.20
10	Bajo riesgo	989+20	212.93	42.04	67.20	83.77	44%	120.64
11	Bajo riesgo	1027+20	309.92	19.23	58.52	73.03	41%	111.41

#	² Categoría	Posición [km]	ASNM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
12	Bajo riesgo	1041+20	471.85	2.76	44.02	75.46	41%	1.44
13	Bajo riesgo	1073+20	349.43	9.20	54.98	72.12	43%	114.79
14	Bajo riesgo	1079+20	361.38	7.29	53.91	75.46	43%	6.42
15	Bajo riesgo	1127+20	404.25	21.70	32.51	54.84	42%	61.95
16	Bajo riesgo	1147+20	274.71	23.80	44.11	54.84	43%	42.57
17	Bajo riesgo	1171+20	278.50	12.06	43.77	49.70	40%	151.69

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} Y PS es entre 1 y 2 kg/cm². ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} Y PS es menor a 1 kg/cm².

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 80%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

Tabla 3.9 Corrosión interna de bajo riesgo 35% < d/t < 40%
Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	Categoría	Posición [km]	ASNM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
1	Bajo riesgo	50+00	62.74	27.19	46.61	54.75	37%	82.35
2	Bajo riesgo	18+.00	53.87	25.32	47.84	52.72	36%	132.83
3	Bajo riesgo	77+.20	48.74	11.51	35.24	39.39	38%	159.85
4	Bajo riesgo	805+20	95.73	43.23	48.99	75.46	38%	27.01
5	Bajo riesgo	807+20	101.92	41.69	48.44	75.46	35%	40.59
6	Bajo riesgo	809+20	110.64	39.92	47.66	75.46	36%	73.09
7	Bajo riesgo	823+20	105.10	33.50	48.15	72.40	35%	132.06
8	Bajo riesgo	883+20	215.26	44.71	58.97	75.31	38%	83.14
9	Bajo riesgo	891+20	197.20	42.38	60.59	71.82	36%	139.82
10	Bajo riesgo	927+20	306.87	14.80	50.7	75.46	38%	46.64
11	Bajo riesgo	929+20	313.21	13.24	50.27	75.46	39%	23.07
12	Bajo riesgo	941+20	318.62	6.83	49.73	75.46	38%	18.03
13	Bajo riesgo	953+20	247.27	57.20	64.128	89.06	37%	88.58
14	Bajo riesgo	1013+20	260.84	25.60	62.913	75.46	38%	92.28
15	Bajo riesgo	1015+20	260.06	25.39	62.98	75.46	37%	13.68

#	Categoría	Posición [km]	ASNM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
16	Bajo riesgo	1047+20	368.12	11.20	53.31	75.46	36%	59.39
17	Bajo riesgo	1109+20	520.74	15.46	22.09	65.09	35%	157.20

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm². ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es menor a 1 kg/cm².

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 80%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

Tabla 3.10 Corrosión interna de bajo riesgo 30% < d/t < 35%
Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
1	Bajo riesgo	0	34.05	46.10	49.18	51.87	34%	167.86
2	Bajo riesgo	200+00	13.80	22.37	51.43	54.75	30%	100.30
3	Bajo riesgo	280+00	5.07	37.96	50.52	54.75	34%	33.37
4	Bajo riesgo	350+00	12.96	14.38	49.82	54.75	31%	33.91
5	Bajo riesgo	400+00	10.31	37.85	52.66	54.75	34%	64.26
6	Bajo riesgo	609+20	61.72	17.62	22.34	68.44	32%	71.69
7	Bajo riesgo	613+20	47.73	18.22	23.59	54.84	31%	70.56
8	Bajo riesgo	829+20	139.52	27.46	45.07	75.46	34%	68.24
9	Bajo riesgo	835+20	132.13	25.16	45.73	75.46	32%	12.90
10	Bajo riesgo	100+.20	254.72	31.21	63.46	89.06	34%	2.59
11	Bajo riesgo	106+.20	360.50	9.34	53.99	75.46	30%	42.58
12	Bajo riesgo	1071+20	361.82	8.38	53.87	75.46	32%	77.48
13	Bajo riesgo	1080+20	363.00	33.62	36.21	68.44	33%	3.63
14	Bajo riesgo	1081+20	364.77	33.32	36.05	66.06	32%	158.13
15	Bajo riesgo	1093+20	446.35	24.35	28.75	66.12	32%	159.43
16	Bajo riesgo	1099+20	472.03	21.21	26.45	68.44	31%	18.28
17	Bajo riesgo	1122+20	405.00	24.01	32.45	68.44	34%	48.06
18	Bajo riesgo	1135+20	368.53	21.10	35.71	53.24	31%	121.27
19	Bajo riesgo	1175+20	320.40	6.41	40.02	54.84	31%	76.97

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm^2 . ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es menor a 1 kg/cm^2 .

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 80%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

De la Tabla 3.11 a la 3.16 el análisis se determino para una la presión máxima por golpe de ariete en un escenario con posible fallo de válvulas con eficiencia de relevo del 20%. Los siguientes puntos requieren atención en un lapso no mayor a 180 días.

Tabla 3.11 Corrosión interna de bajo riesgo $55\% \leq d/t < 60\%$
Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNMM [m]	P_o [kg/cm^2]	³ P_{max} [kg/cm^2]	⁴ PS [kg/cm^2]	d / t [%]	L [mm]
1	Bajo riesgo	519+20	52.27	24.95	39.27	48.26	55%	124.29
2	Bajo riesgo	554+20	66.01	18.04	38.04	54.75	56%	4.67
3	Bajo riesgo	593+20	51.60	21.12	29.62	57.29	59%	147.06
4	Bajo riesgo	945+20	294.70	7.00	68.43	75.46	58%	36.80
5	Bajo riesgo	1080+20	363.00	7.00	43.98	74.37	57%	66.62
6	Bajo riesgo	1095+20	463.70	22.51	34.97	59.02	59%	127.40
7	Bajo riesgo	1107+20	526.84	15.19	29.32	68.44	55%	21.26

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm^2 . ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es menor a 1 kg/cm^2 .

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 20%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

Tabla 3.12 Corrosión interna de bajo riesgo $50\% \leq d/t < 55\%$
Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNMM [m]	P_o [kg/cm^2]	³ P_{max} [kg/cm^2]	⁴ PS [kg/cm^2]	d / t [%]	L [mm]
1	Bajo riesgo	470+00	143.49	3.05	49.97	54.65	54%	60.80
2	Bajo riesgo	484+20	55.15	30.38	39.01	47.38	52%	157.64
3	Bajo riesgo	514+20	175.00	14.78	28.28	48.99	51%	131.98
4	Bajo riesgo	544+20	51.63	20.95	39.33	54.75	51%	34.52

#	² Categoría	Posición [km]	ASNMM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
5	Bajo riesgo	699+20	53.15	0.53	29.48	49.66	53%	98.83
6	Bajo riesgo	717+70	7.70	32.35	46.50	37.10	51%	123.10
7	Bajo riesgo	1001+20	285.41	29.48	69.26	89.06	53%	33.21
8	Bajo riesgo	1049+20	348.87	12.64	63.58	75.46	52%	18.66
9	Bajo riesgo	1059+20	325.46	13.32	39.57	75.46	51%	57.36
10	Bajo riesgo	1103+20	502.38	17.94	31.51	68.44	54%	59.35
11	Bajo riesgo	1119+20	436.40	21.62	37.42	68.44	52%	41.15
12	Bajo riesgo	1125+20	417.88	21.43	39.07	54.84	51%	23.44

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm². ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es menor a 1 kg/cm².

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 20%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

Tabla 3.13 Corrosión interna de bajo riesgo $45\% \leq d/t < 50\%$
Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNMM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
1	Bajo riesgo	70+00	181.03	10.07	45.25	54.75	45%	28.79
2	Bajo riesgo	589+20	77.99	11.29	36.97	49.06	49%	140.87
3	Bajo riesgo	664+20	29.97	9.61	31.55	51.70	48%	89.15
4	Bajo riesgo	674+20	54.21	5.44	29.38	54.84	47%	10.07
5	Bajo riesgo	694+20	16.73	4.79	32.74	54.84	45%	15.51
6	Bajo riesgo	801+20	96.68	45.12	59.55	75.46	49%	4.80
7	Bajo riesgo	911+20	234.24	29.19	67.92	71.00	48%	97.11
8	Bajo riesgo	969+20	222.89	51.28	74.85	83.36	46%	117.99
9	Bajo riesgo	975+20	223.44	48.19	74.80	89.06	48%	20.66
10	Bajo riesgo	1011+20	254.91	27.14	71.99	83.03	48%	112.22
11	Bajo riesgo	1131+20	384.24	21.59	42.08	54.84	47%	13.12

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm². ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es menor a 1 kg/cm².

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 20%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

Tabla 3.14 Corrosión interna de bajo riesgo $40\% \leq d/t < 45\%$
 Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
1	Bajo riesgo	679+20	51.03	4.72	29.67	51.19	43%	113.73
2	Bajo riesgo	705+20	2.38	3.87	34.02	54.41	40%	78.34
3	Bajo riesgo	787+20	87.38	6.69	39.37	42.47	43%	16.02
4	Bajo riesgo	859+20	180.80	8.95	52.02	75.46	40%	68.46
5	Bajo riesgo	971+20	220.45	50.48	75.07	89.06	41%	13.20
6	Bajo riesgo	989+20	212.93	42.04	75.74	83.77	44%	120.64
7	Bajo riesgo	1027+20	309.92	19.23	67.06	73.03	41%	111.41
8	Bajo riesgo	1041+20	471.85	2.76	52.57	75.46	41%	1.44
9	Bajo riesgo	1073+20	349.43	9.20	63.53	72.12	43%	114.79
10	Bajo riesgo	1079+20	361.38	7.29	62.46	75.46	43%	6.42
11	Bajo riesgo	1127+20	404.25	21.70	40.29	54.84	42%	61.95
12	Bajo riesgo	1147+20	274.71	23.80	51.89	54.84	43%	42.57

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm². ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es menor a 1 kg/cm².

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 20%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

Tabla 3.15 Corrosión interna de bajo riesgo $35\% \leq d/t < 40\%$
 Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNM [m]	P _o [kg/cm ²]	³ P _{max} [kg/cm ²]	⁴ PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
1	Bajo riesgo	805+20	95.73	43.23	59.64	75.46	38%	27.01
2	Bajo riesgo	807+20	101.90	41.69	59.09	75.46	35%	40.59
3	Bajo riesgo	809+20	110.64	39.92	58.31	75.46	36%	73.09
4	Bajo riesgo	823+20	105.10	33.50	58.80	72.40	35%	132.06
5	Bajo riesgo	883+20	215.26	44.71	69.62	75.31	38%	83.14
6	Bajo riesgo	927+20	306.87	14.80	61.42	75.46	38%	46.64
7	Bajo riesgo	929+20	313.21	13.24	60.85	75.46	39%	23.07

8	Bajo riesgo	941+20	318.62	6.83	60.37	75.46	38%	18.03
9	Bajo riesgo	953+20	247.27	57.20	72.67	89.06	37%	88.58
10	Bajo riesgo	1013+20	260.84	25.60	71.46	75.46	38%	92.28
11	Bajo riesgo	1015+20	260.06	25.39	53.20	75.46	37%	13.68
12	Bajo riesgo	1047+20	368.12	11.20	43.53	75.46	36%	59.39
13	Bajo riesgo	1109+20	520.74	15.46	29.87	65.09	35%	157.20

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm^2 . ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es menor a 1 kg/cm^2 .

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 20%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

Tabla 3.16 Corrosión interna de bajo riesgo $30\% \leq d/t < 35\%$
Peligros potenciales: Corrosión interior¹

#	² Categoría	Posición [km]	ASNM [m]	P_o [kg/cm^2]	³ P_{max} [kg/cm^2]	⁴ PS [kg/cm^2]	d / t [%]	L [mm]
1	Bajo riesgo	609+20	61.72	17.62	28.71	68.44	32%	71.69
2	Bajo riesgo	613+20	47.73	18.22	29.96	54.84	31%	70.56
3	Bajo riesgo	829+20	139.50	27.46	55.72	75.46	34%	68.24
4	Bajo riesgo	835+20	132.0	25.16	56.38	75.46	32%	12.90
5	Bajo riesgo	1003+20	254.72	31.21	72.00	89.06	34%	2.59
6	Bajo riesgo	1065+20	360.50	9.34	62.54	75.46	30%	42.58
7	Bajo riesgo	1071+20	361.82	8.38	62.42	75.46	32%	77.48
8	Bajo riesgo	1080+20	363.00	33.62	43.98	68.44	33%	3.63
9	Bajo riesgo	1081+20	364.77	33.32	43.83	66.06	32%	158.13
10	Bajo riesgo	1093+20	446.35	24.35	36.52	66.12	32%	159.43
11	Bajo riesgo	1099+20	472.03	21.21	34.23	68.44	31%	18.28
12	Bajo riesgo	1122+20	405.00	24.01	40.23	68.44	34%	48.06
13	Bajo riesgo	1135+20	368.53	21.10	43.49	53.24	31%	121.27
14	Bajo riesgo	1175+20	320.40	6.41	47.80	54.84	31%	76.97

¹ Galvánica.

² PRECAUCION: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es entre 1 y 2 kg/cm^2 . ATENCION INMEDIATA: puntos en donde la diferencia entre P_{max} y PS es menor a 1 kg/cm^2 .

³ Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 20%.

⁴ Presión segura según norma ASME-B31G.

3.4.2 Peligros potenciales: Categoría 6 (Equipo).

En la Tabla 3.17 P_s y P_d corresponden a la presión de succión y presión de descarga respectivamente. Mientras que $P_{m\acute{a}x}$ es el nivel de presión por golpe de ariete menos la altura sobre nivel del mar en cada estación. Para un posible escenario con una eficiencia de relevo de 80%.

Tabla 3.17 Peligros potenciales: Mal funcionamiento del equipo – Falla del sello/bomba¹

#	Nombre de la estación	Posición [km]	ASNMM [m]	P_s [kg/cm ²]	P_{max} succión [kg/cm ²]	P_d [kg/cm ²]	P_{max} descarga [kg/cm ²]
1	Nuevo Teapa	0+00	34.05	6.00	n.a.	46.10	49.20
2	Mazumiapan	120+47	42.20	6.00	49.20	45.82	48.90
3	El Tejar	250+97	10.52	6.00	48.90	46.96	50.00
4	Carranza	364+10	55.07	6.00	50.00	45.58	48.70
5	Poza Rica	484+20	58.72	6.00	48.70	30.38	32.50
6	Naranjos	593+20	51.60	13.00	32.50	21.12	23.20
7	Madero	709+20	10.11	3.00	23.20	36.17	38.70
8	González	800+70	97.00	4.00	38.70	45.33	48.90
9	Zaragoza	861+50	190.00	7.00	48.90	57.68	61.20
10	Victoria	945+20	295.00	7.00	61.20	57.01	59.90
11	Linares	1080+20	363.00	7.00	59.90	33.62	36.20
12	Cadereyta	1179+19	326.00	4.00	36.20	n.a.	n.a

¹Paro súbito de estación. Las presiones máximas a la succión y a la descarga corresponden al pulso de Jokowsky con equipo de relevo con eficiencia del 80%.

Para la siguiente Tabla 3.18 se simula un posible escenario con fallo de válvulas, una eficiencia de relevo del 20%.

Tabla 3.18 Peligros potenciales: Mal funcionamiento del equipo de relevo²

#	Nombre de la estación	Posición [km]	ASNMM [m]	P_s [kg/cm ²]	P_{max} succión [kg/cm ²]	P_d [kg/cm ²]	P_{max} descarga [kg/cm ²]
1	Nuevo Teapa	0+00	34.05	6.00	n.a	46.10	58.40
2	Mazumiapan	120+40	42.20	6.00	58.40	45.82	58.10
3	El Tejar	250+95	10.52	6.00	58.10	46.96	59.30
4	Carranza	364+10	55.07	6.00	59.30	45.58	57.90

5	Poza Rica	484+20	58.72	6.00	57.90	30.38	38.70
6	Naranjos	593+20	51.60	13.00	38.70	21.12	29.60
7	Madero	709+20	10.11	3.00	29.60	36.17	46.30
8	González	800+70	97.00	4.00	46.30	45.33	59.50
9	Zaragoza	861+50	190.00	7.00	59.50	57.68	71.90
10	Victoria	945+20	295.00	7.00	71.90	57.01	68.40
11	Linares	1080+20	363.00	7.00	68.40	33.62	44.00
12	Cadereyta	1179+10	326.00	4.00	44.00	n.a.	n.a

² Las presiones máximas a la succión y a la descarga corresponden al pulso de Jokowsky con equipo de relevo con eficiencia del 20%.

3.4.3 Peligros potenciales: Categoría 8 (Operaciones incorrectas).

La categoría No. 8 corresponde a Operaciones incorrectas- Procedimientos de operación incorrectos o no aplicados. En este caso se analiza el funcionamiento de los 4 loops y cómo afecta el cierre intempestivo de alguno de ellos o de todos. Se calculó la presión máxima ($P_{máx}$) en la entrada y salida de cada estación en dónde están ubicados los loops (Tabla 3.19).

Tabla 3.19 Peligros potenciales: Procedimientos de operación incorrectos o no aplicados¹

#	Nombre del loop	Posición inicial [km]	Posición final [km]	ASNM Inicial [m]	ASNM final [m]	P_o entrada [kg/cm ²]	P_o salida [kg/cm ²]	P_{max} entrada [kg/cm ²]	P_{max} salida [kg/cm ²]	Observaciones
1	3 Hermanos-Madero	613.20	709.20	47.73	10.11	18.22	3.00	43.21	3.00	P_d Naranjos pasa de 21.12 a 46.11 kg/cm ²
2	km 744+50-González	744.50	800.70	23.00	97.00	18.26	4.00	36.50	4.00	P_d Madero pasa de 36.17 a 54.41 kg/cm ²
3	km 1013+20-Linares	1013.20	1080.20	261.00	363.00	25.60	7.00	48.20	7.00	P_d Victoria pasa de 57.01 a 79.61 kg/cm ²
4	Linares- km 1122+20	1080.20	1122.20	363.00	405.00	33.62	24.01	47.60	24.01	P_d Linares pasa de 33.62 a 47.60 kg/cm ²

¹ Cierre intempestivo de loop.

3.4.4 Peligros potenciales: Categoría 9 (Clima y fuerzas externas).

Para la categoría No. 9 correspondiente a Clima y fuerzas externas: Deslave-erosión. Se consideraron los ríos que se cruzan a lo largo de la línea con el ducto. En el caso del sistema de estudio se encontraron 23 ríos, listados en la Tabla 3.20. Se analizó la presión de operación (P_o) y presión máxima ($P_{m\acute{a}x}$) en el punto exacto por donde pasa el río.

Tabla 3.20 Peligros potenciales: Deslave – erosión¹

#	Nombre del Escurrimiento Superficial	Posición [km]	ASNM [m]	P_o [kg/cm ²]	² P_{max} [kg/cm ²]	PS [kg/cm ²]
1	Río Tuxtla	115+10	30.97	8.75	49.45	54.75
2	Río Papaloapan	191+56	7.52	25.67	51.99	54.75
3	Río Cotaxtla	242+91	11.04	8.52	51.68	52.88
4	Río Jamapa	246+80	9.62	7.44	51.80	50.39
5	Río La Antigua	280+05	5.07	37.91	50.52	54.72
6	Río Actopan	291+23	6.46	34.17	50.40	49.14
7	Río Palma Sola	334+02	42.62	16.95	47.16	54.75
8	Río Santa Ana	351+5	12.99	13.88	49.81	54.75
9	Río Yehuascalco	366+00	43.72	45.97	49.67	54.75
10	Río Misantla	389+30	40.43	38.63	49.96	54.75
11	Río Nautla	402+49	12.31	36.85	52.48	54.75
12	Río Tecolutla	452+26	38.31	18.25	50.15	54.75
13	Río Cazones	486+76	132.96	22.99	25.81	51.19
14	Río Pantepec	543+99	50.55	21.07	33.19	54.75
15	Río Buena Vista	562+44	89.93	14.58	29.66	54.75
16	Río Tancochín	604+29	51.59	19.32	23.24	68.44
17	Río Cucharas	629+93	31.87	16.31	25.01	54.84
18	Río Pánucoa	712+22	10.35	34.70	38.68	84.94
19	Río San Pedro	970+47	221.31	50.73	66.45	86.97

#	Nombre del Esguerrimiento Superficial	Posición [km]	ASNIM [m]	P_o [kg/cm ²]	² P_{max} [kg/cm ²]	PS [kg/cm ²]
20	Río Santa Engracia	971+11	220.54	50.48	66.51	88.77
21	Río Purificación	984+88	229.49	42.72	65.71	89.06
22	Río Pablillos	1077+65	351.27	8.41	54.81	75.45
23	Río San Juan	1173+40	295.40	9.52	42.26	54.84

¹ Pérdida de contención provocada por esguerrimiento superficial.

² Presión máxima por golpe de ariete con eficiencia de relevo del 80%.

Capítulo 4

4. Correspondencia entre Peligros Potenciales y ZHV

En la hipótesis de la tesis se propone utilizar las variables hidráulicas como un parámetro adicional al momento de determinar las zonas hidráulicas vulnerables del sistema.

La metodología mostrada en el capítulo anterior detalla los cálculos realizados para obtener el análisis hidráulico, el cual fue presentado en tablas. En las tablas se puede observar que se identificaron las zonas hidráulicas vulnerables y se clasificaron por categorías de acuerdo a los peligros potenciales correspondientes.

Se analizaron las zonas hidráulicas vulnerables para cuatro categorías de los peligros potenciales: 1. Corrosión interna, 2. Equipo (Mal funcionamiento), 3. Operaciones incorrectas y 4. Clima y fuerzas externas (Deslaves).

En el apartado siguiente observaremos los criterios de ponderación que se desarrollaron para priorizar las zonas hidráulicas vulnerables encontradas en el sistema de estudio.

4.1 Criterios de ponderación para peligros potenciales

Para clasificar los puntos de las tablas anteriores se propone una ponderación con tres categorías (Tabla 4.1). El criterio para definir un punto como "Precaución" es cuando la diferencia entre P_{\max} y P_S es entre 1 y 2 kg/cm^2 . Un punto se considera "Atención inmediata" cuando la diferencia entre P_{\max} y P_S es menor a 1 kg/cm^2 . El criterio para definir un punto como "Bajo riesgo" es cuando la diferencia entre P_{\max} y P_S es mayor a 2 kg/cm^2 .

Tabla 4.1 Ponderación de peligros potenciales

	Ponderación	Criterios
	Atención inmediata	$P_S - P_{\max} < 1 \text{ kg/cm}^2$
	Precaución	$2 \text{ kg/cm}^2 > P_S - P_{\max} > 1 \text{ kg/cm}^2$

	Bajo riesgo	$P_s - P_{max} > 2 \text{ kg/cm}^2$
---	-------------	-------------------------------------

4.1.1 Ponderación de peligros potenciales. Categoría 1 (Corrosión interna)

Dentro de la Categoría 2 "Corrosión interna" se observa en la Tabla 3.3 que hay 12 puntos que requieren atención prioritaria. Al plantearnos la pregunta ¿Cuál es el que tiene la mayor posibilidad de ocurrencia si todos generan las mismas consecuencias? Se pensaría que el punto con mayor porcentaje de corrosión (d/t) es el que requiere ser atendido primero. Sin embargo la realidad es que hay otros factores a considerar, tales como la presión máxima y presión segura.

A continuación se presentan dos puntos para ejemplificar la idea principal. De los puntos 1 y 6 de la Tabla 3.3 podemos observar que el punto 1 es el que tiene el porcentaje de corrosión más alto. Sin embargo si se realiza un análisis considerando la presión, podemos observar que el punto 6 es el que requiere mayor atención, debido a que la presión máxima es mayor que la presión segura, lo cual nos indica que ante un posible evento transitorio el punto 6 es el que tiene mayor posibilidad de ruptura.

#	Categoría	Posición [km]	ASNMM [m]	P_o [kg/cm ²]	P_{max} [kg/cm ²]	PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
1	Precaución	30+00	15.62	37.95	50.83	52.07	56	79.58
6	Atención inmediata	290+00	6.04	34.61	50.44	48.37	47	165.56

Además se analizó un posible escenario simulando un posible fallo en las válvulas, para esto se calcularon las $P_{máx}$ para una eficiencia de relevo del 20%. (Tabla 3.4).

Si analizamos los puntos 4 y 32 de la Tabla 3.4, los cuales son los mismos que el punto 1 y 6 de la Tabla 3.3, pero para una eficiencia de relevo de 20% podemos observar que ante la falla de una válvula la presión máxima aumentaría aproximadamente 10 Kg/cm². La PS sigue siendo la misma de 52.07 kg/cm². Lo anterior nos indica que ante un posible fallo de válvulas, el riesgo de una ruptura sería aún mayor, por lo tanto la priorización de estos puntos sería "Atención inmediata".

#	Categoría	Posición [km]	ASNMM [m]	P_o [kg/cm ²]	P_{max} [kg/cm ²]	PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
---	-----------	---------------	-----------	-----------------------------	---------------------------------	--------------------------	-----------	--------

4	Atención inmediata	30+00	15.62	37.95	60.06	52.07	56	79.58
32	Atención inmediata	290+00	6.04	34.61	59.67	48.37	47	165.56

Los puntos categorizados como "Bajo riesgo" fueron clasificados en porcentaje de mayor a menor corrosión con una eficiencia de relevo del 80%. Se tomaron dos puntos de la Tabla 3.5, los puntos 2 y 6, en los cuales se puede observar que el porcentaje de corrosión es arriba de 50%. Según el PAID estos puntos requieren atención inmediata. Sin embargo al realizar el análisis hidráulico se observa que son de bajo riesgo, debido a que la PS es mayor que la P_{máx}.

#	² Categoría	Posición [km]	ASNМ [m]	P _o [kg/cm ²]	P _{máx} [kg/cm ²]	PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
2	Bajo riesgo	250+97	10.52	46.96	50.03	54.75	58%	35.08
6	Bajo riesgo	759+20	19.41	16.58	37.87	42.47	50%	57.13

Por otro lado se observan dos puntos de la Tabla 3.10 con un porcentaje de corrosión bajo y clasificados como "Bajo riesgo". En este caso el análisis hidráulico coincide con la interpretación actual del PAID. Se tienen P_{máx} mucho menores a las PS y una corrosión menor al 35%, por lo tanto estos puntos no requieren atención inmediata.

#	² Categoría	Posición [km]	ASNМ [m]	P _o [kg/cm ²]	P _{máx} [kg/cm ²]	PS [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
6	Bajo riesgo	609+20	61.72	17.62	22.34	68.44	32%	71.69
16	Bajo riesgo	1099+20	472.03	21.21	26.45	68.44	31%	18.28

Para las siguientes tablas se simula un posible escenario con fallo de válvulas, una eficiencia de relevo del 20%. Así como en las tablas de arriba podemos observar que independientemente de su porcentaje de corrosión, son clasificados como "Bajo riesgo". Esto se debe al análisis hidráulico que muestra que la que la PS es mayor a la P_{máx}. Por ejemplo se observan algunos puntos de las Tablas 3.11 (punto 4 y 6) y 3.16 (punto 1), los cuales tienen baja probabilidad de ocurrencia.

#	Categoría	Posición [km]	ASNМ [m]	P _o [kg/cm ²]	P _{máx} [kg/cm ²]	P _s [kg/cm ²]	d / t [%]	L [mm]
4	Bajo riesgo	945+20	294.70	7.00	68.43	75.46	58%	36.80

6	Bajo riesgo	717+70	7.70	32.35	46.50	37.10	51%	123.10
1	Bajo riesgo	609+20	61.72	17.62	28.71	68.44	32%	71.69

4.1.2 Ponderación de peligros potenciales. Categoría 6 (Equipo)

La Categoría 6 de los Peligros Potenciales clasificado como "Equipo" analiza las posibles fallas en las estaciones de bombeo y rebombeo. Por lo tanto se analizaron las Presiones de succión (P_s) y la Presión de descarga (P_d) para cada estación.

Los siguientes puntos son extraídos de la Tabla 3.17 con una eficiencia de relevo del 80%.

#	Nombre de la estación	P_s [kg/cm ²]	P_{max} succión [kg/cm ²]	P_d [kg/cm ²]	P_{max} descarga [kg/cm ²]
2	Mazumiapan	6.00	58.40	45.82	58.10
3	El Tejar	6.00	58.10	46.96	59.30
4	Carranza	6.00	59.30	45.58	57.90

Los siguientes tres puntos son tomados de la Tabla 3.18 muestran una eficiencia de relevo del 20% que simula un posible fallo de válvulas.

#	Nombre de la estación	P_s [kg/cm ²]	P_{max} succión [kg/cm ²]	P_d [kg/cm ²]	P_{max} descarga [kg/cm ²]
2	Mazumiapan	6.00	49.20	45.82	48.90
3	El Tejar	6.00	48.90	46.96	50.00
4	Carranza	6.00	50.00	45.58	48.70

Si comparamos las Presiones máximas de succión (P_{max} succión) y de descarga (P_{max} descarga) en cada escenario podemos observar que para una menor eficiencia la presión aumenta aproximadamente 10 kg/cm² por estación. Esto nos indica que los puntos cercanos a las estaciones de bombeo son generalmente vulnerables a sobrepresiones.

Para detallarlo más observemos la Figura 4.1 que muestra el diagrama de energía simulando un fallo de válvulas (eficiencia de relevo 20%).

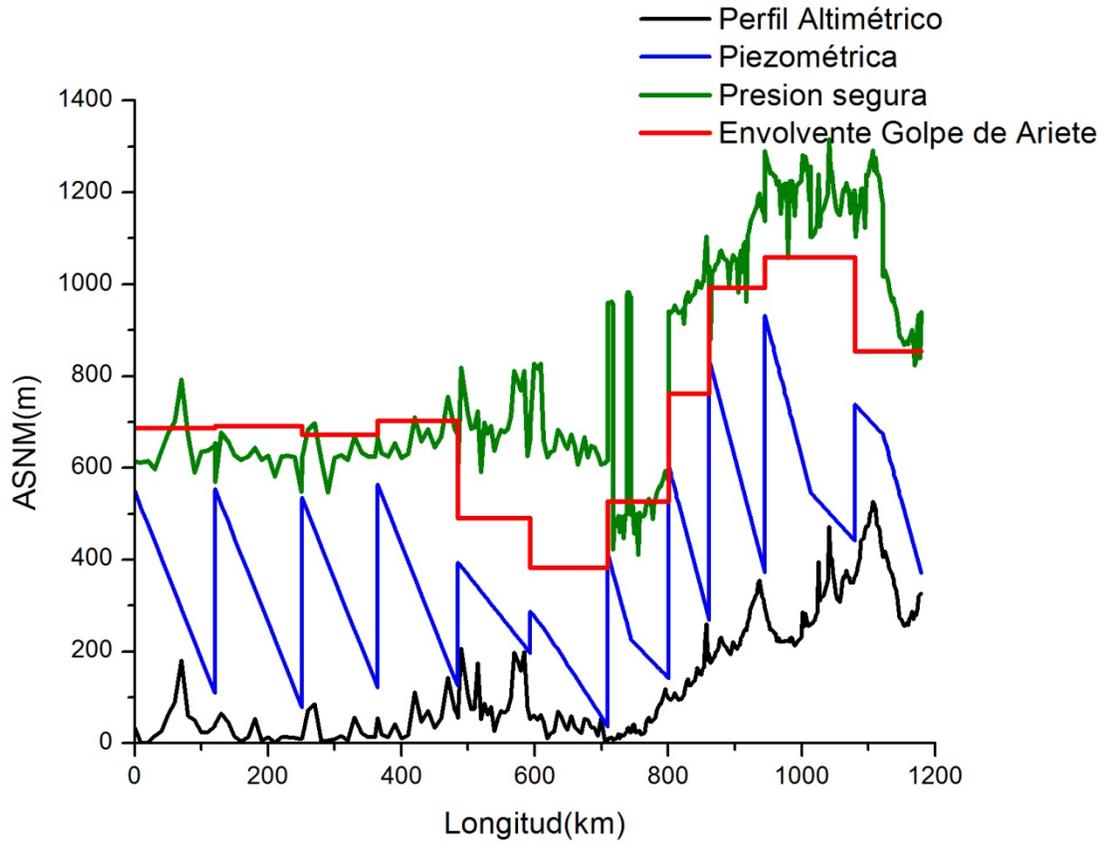


Figura 4.1 Diagrama de energía con fallo de válvulas

La sobrepresión (línea roja) en la Figura 4.1 muestra el escenario de fallo de válvulas, lo cuál sería de alto riesgo debido a que, al menos en la mitad de los segmentos, la línea de sobrepresión sobrepasa la línea de presión segura (línea verde), lo cual nos indica que en esos puntos existen zonas hidráulicamente vulnerables.

4.1.3 Ponderación de peligros potenciales. Categoría 8 (Operaciones incorrectas)

En la Categoría 8 correspondiente a Operaciones incorrectas- Procedimientos de operación incorrectos o no aplicados. Se analiza el funcionamiento de los loops en el sistema de estudio.

En los puntos extraídos de la Tabla 3.19 se muestra lo que sucedería si se cerrará intempestivamente algún loop. Se analizan las P_{max} en la entrada y la salida de cada loop.

#	Nombre del loop	P _o entrada	P _o salida [kg/cm ²]	P _{max} entrada	P _{max} salida	Observaciones
---	-----------------	------------------------	---	--------------------------	-------------------------	---------------

		[kg/cm ²]		[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	
1	3 Hermanos- Madero	18.22	3.00	43.21	3.00	P _d Naranjos pasa de 21.12 a 46.11 kg/cm ²
4	Linares- km 1122+20	33.62	24.01	47.60	24.01	P _d Linares pasa de 33.62 a 47.60 kg/cm ²

En la columna de "Observaciones" se observa que al cerrar intempestivamente un loop las presiones de descarga aumentan considerablemente. Por ejemplo en el loop "3 Hermanos-Madero" la presión cambia de 21.12 a 46.11 kg/cm², el aumento de presión es aproximadamente de 15 kg/cm². Lo anterior nos indica que los loops se encuentran operando para disminuir la carga de presión en el ducto y si por algún error sin tomar las medidas adecuadas se llegara a cerrar algún loop tendríamos una zona vulnerable en la zona donde se encuentra (Figura 4.2).

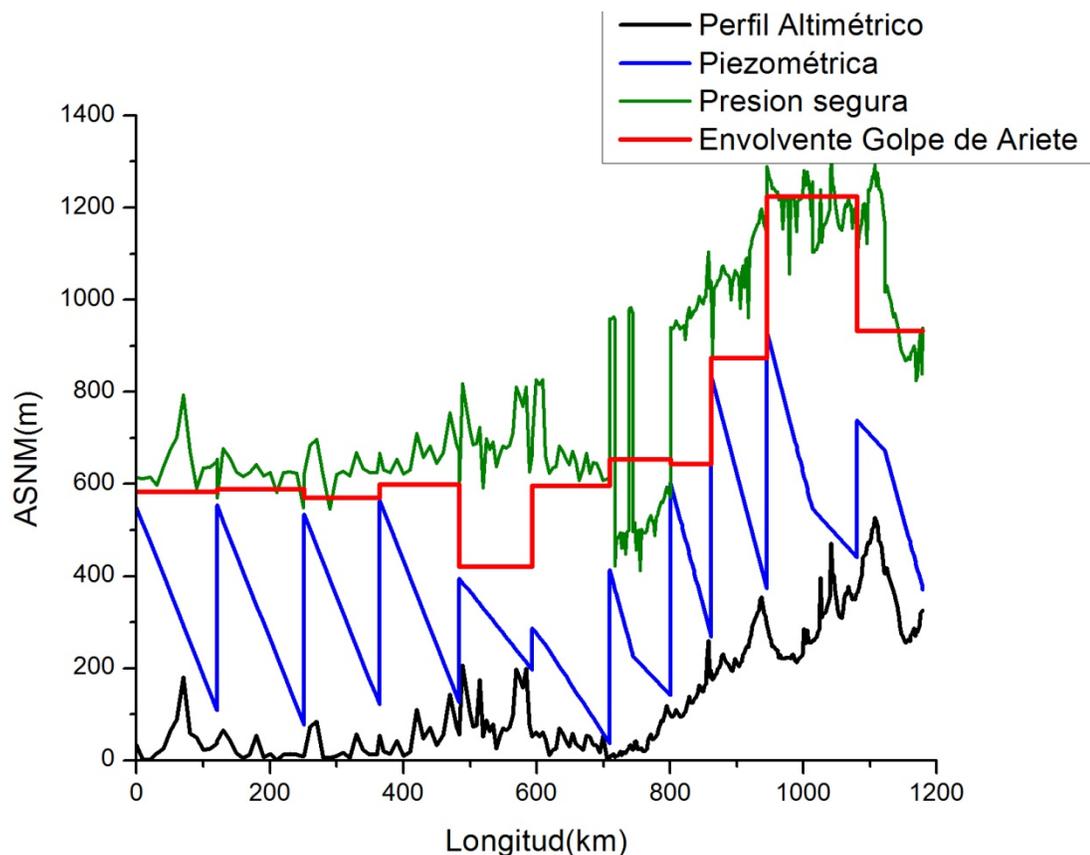


Figura 4.2 Diagrama de energía SIN loops

La Figura 4.2 muestra el diagrama de energía sin funcionamiento de los loops. La línea de sobrepresión (línea roja) muestra que al no funcionar un loop o si se llegara a cerrar intempestivamente, la sobrepresión excede a la PS en las zonas donde se encuentran los loops.

4.1.4 Ponderación de peligros potenciales. Categoría 9 (Clima y fuerzas externas)

En la Categoría 9 correspondiente a Clima y fuerzas externas se analizan los ríos que pasan a través del sistema. A lo largo del ducto contamos con 23 ríos como se observó en la Tabla 3.20. Lo que se analiza en este escenario es la presión segura y la Presión máxima en cada río que cruza por el ducto.

En los puntos 4 y 6 extraídos de la Tabla 3.20, que corresponden al Río Jamapa y Río Actopan existen dos puntos vulnerables que requieren atención debido a que la Presión segura está por debajo de la presión máxima a la que opera el sistema.

Otro punto que se debe considerar en la Tabla 3.20 es el 6, que corresponde al Río Coaxtla. Debido a que tiene una Presión Operativa baja, 8.58 kg/cm^2 , indica que es un Río cercano a una estación de bombeo. Si llegara a ocurrir un transitorio hidráulico, los puntos cercanos a las estaciones de bombeo son los puntos con mayor posibilidad de fallar. Es una consideración importante tomando en cuenta que se encuentra en una zona con recursos naturales y algún posible fallo en ese punto del ducto tendría graves consecuencias.

#	Nombre del Ecurrimiento Superficial	Posición [km]	ASNM [m]	P_o [kg/cm ²]	² P_{max} [kg/cm ²]	P_s [kg/cm ²]
3	Río Cotaxtla	242+91	11.04	8.58	51.68	52.88
4	Río Jamapa	246+80	9.62	7.44	51.80	50.39
6	Río Actopan	291+23	6.46	34.17	50.40	49.14

Capítulo 5

5. Conclusiones y recomendaciones

El transporte de hidrocarburos se realiza a través de ductos a presión los cuales recorren todo el país. La NOM-027 es la norma mexicana encargada de regular el transporte de hidrocarburos dentro del país. Lo que pretende esta norma es, con base a un procedimiento a seguir, evaluar los posibles riesgos en el transporte de hidrocarburos y disminuir la probabilidad de ocurrencia. En la norma se obliga a identificar los peligros potenciales, cuantificarlos y evaluar el riesgo. Además obliga a que se desarrolle un Plan Maestro de Integridad de Ductos (PAID) para cada sistema de ductos. Sin embargo la priorización de riesgos planteada actualmente en el PAID dista mucho de ser la ideal debido a que no considera las variables transversales al proceso.

En la hipótesis de este trabajo se propuso considerar las variables de proceso transversales a los peligros potenciales como resultado de un análisis hidráulico. De acuerdo al objetivo propuesto se identificaron los peligros potenciales, las variables hidráulicas del proceso y se logró una correspondencia con las zonas hidráulicas vulnerables en un sistema que sirvió como caso de estudio.

El sistema que se utilizó como caso de estudio consiste en un conjunto de tuberías que transportan crudo de Nueva Teapa a Cadereyta, el sistema cuenta con dos líneas, así que eligió la línea uno con un diámetro variable de 30-24-20 pulgadas, una longitud de 1179.18 km, con 12 estaciones de bombeo y rebombeo, con 4 loops en funcionamiento, un flujo variable de 370 MBD hasta Poza Rica y 250 MBD a Nueva Teapa. Además se encontró que a través del oleoducto cruzan 23 ríos.

Para realizar el análisis hidráulico la metodología se dividió en dos etapas. En la primera se identificaron las ZHV realizando una simulación en estado permanente y otra en estado transitorio. Además se calcularon las envolventes de Presiones Seguras debidas a los defectos de la tubería causados por la corrosión, abolladuras o defectos de construcción. Debido a que el caso de estudio presenta particularidades, el arreglo de las tuberías en serie y en paralelo, se dificultó el planteamiento de los escenarios de simulación.

La segunda parte de la metodología consistió en identificar algunos peligros potenciales en los que se asocian variables hidráulicas con fines de ponderación del riesgo asociado. Para esta tesis sólo se consideraron cuatro categorías de los peligros potenciales, como son: 1. Corrosión interior (corrosión galvánica), 2. Equipo (Mal funcionamiento), 3. Operaciones

incorrectas y 4. Clima y fuerzas externas (por ejemplo deslave de ríos o exposición a cargas vivas constantes). Sin embargo la metodología es de carácter general y puede extenderse a otro tipo de defectos, así como a otros sistemas de estudio.

La metodología que se presenta en este documento es una muestra de que al incluir las variables hidráulicas en la interpretación actual del PAID se obtiene una clasificación de zonas hidráulicas vulnerables con mayor confiabilidad. Las cuales se dividen en tres criterios de prioridad:

1. Atención inmediata
2. Precaución
3. Bajo riesgo

Al clasificar las zonas hidráulicas vulnerables con estos criterios de prioridad se obtienen zonas que la concepción actual del PAID no considera y otras que considera erróneamente (como se muestra en las Tablas 3.5 y 3.6, corrosión arriba del 50% no necesariamente implica una zona vulnerable). Se demostró que no todos los puntos con corrosión mayor al 50% necesitan ser atendidos inmediatamente y que, en cambio, algunos puntos con corrosión incluso de 0% necesitan atención inmediata debido al análisis hidráulico que se realizó.

Se demuestra que al combinar las variables hidráulicas en la detección de zonas hidráulicas vulnerables obtenemos una disminución del 60% aproximadamente en el número de escenarios de alto riesgo, así por ejemplo en lugar de reparar 10 puntos considerados de alto riesgo por el PAID, al incluir las variables hidráulicas solo se encuentran 4 que requieren atención inmediata.

Por otro lado al analizar los puntos que no son considerados por el PAID por su bajo porcentaje de corrosión, se observa que se podrían estar omitiendo un 10% de zonas que sí requieren atención. Así por ejemplo, de 10 puntos con baja corrosión, se encuentra 1 punto que estaba siendo omitido por el PAID y requiere atención inmediata.

Si se consideran las variables hidráulicas como complemento al Plan de Administración de Integridad de Ductos:

1. Se localizan con mayor precisión los puntos que requieren atención a lo largo del ducto para evitar algún incidente.
2. Dejarían de pasar inadvertidos aquellos puntos que actualmente son considerados de bajo riesgo, pero en realidad suponen un riesgo a la integridad del ducto.

Esta metodología se propone como complemento a la interpretación actual del PAID y puede ser aplicada a cualquier sistema de ductos contando con las propiedades y condiciones de operación de cada uno de ellos.

6. Referencias

API. 2001. Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE*. 2001.

ASME, The American Society of Mechanical Engineers. 1991. *ASME B31G. Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines*. New York : ASME, 1991.

García Lugo, Florencio. 2012. *Metodología para determinar la presión de rehabilitación en líneas de transporte de hidrocarburos líquidos*. 2012.

Guaycochea, D and Soto, G. 2008. *Dimensionamiento de válvulas de alivio*. México, D.F. : UAM-A, Informe técnico de distribución restringida, 2008.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2014. INEGI. [En línea] 2014. [Citado el: 13 de Enero de 2014.] <http://www.inegi.org.mx/>.

PAID. 2010. *Plan maestro*. s.l. : PEMEX Plan Maestro. Secretaría de Energía, Gobierno Federal, 2010.

PEMEX. 2013. <http://www.pemex.com/informes/responsabilidad_social/operaciones/desarrollo.html>. *PEMEX*. [En línea] 2013. [Citado el: 23 de Julio de 2013.]

Petróleos Mexicanos, PEMEX. 2011. *Diseño, construcción, inspección y mantenimiento de ductos terrestres para transporte y recolección de hidrocarburos*. México, D.F. : s.n., 2011.

Secretaría de Energía. 2010. *Norma Oficial Mexicana NOM-027-SESH-2010 Norma Oficial Mexicana NOM-027-SESH-2010*,. s.l. : Diario Oficial de la Federación, 2010.

Soto, G and Guaycochea, D. 2007a. *Diplomado en flujo de fluidos y fenómenos. Modulo 5*. México, D.F. : UAM-A, Informe técnico de distribución restringida, 2007a.

Soto, G; Guaycochea, D. 2007b. *Cálculo de presiones seguras de operación en oleoductos y poliductos*. México, D.F. : UAM-A, Informe técnico de circulación restringida, 2007b.