



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería Química e
Industrias Extractivas

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALÚRGICA

*“Estimación de la Confiabilidad Estructural de Ductos en
Condiciones de Operación Reales en Base a la Simulación de
Fluidos”*

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERIA METALÚRGICA

PRESENTA:

Lic. Manuel Ramón Madrigal Cano



Directores de Tesis: Dr. Francisco Caleyó Cereijo
Dr. José Manuel Hallen López

México, D.F. Julio 2013



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F., siendo las 12:00 horas del día 24 del mes de Junio del 2013 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIQIE

para examinar la tesis titulada:

"Estimación de la confiabilidad estructural de ductos en condiciones de operación reales en base a la simulación de fluidos"

Presentada por el alumno:

MADRIGAL

Apellido paterno

CANO

Apellido materno

MANUEL RAMÓN

Nombre(s)

Con registro:

A	1	1	1	0	0	3
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA METALÚRGICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

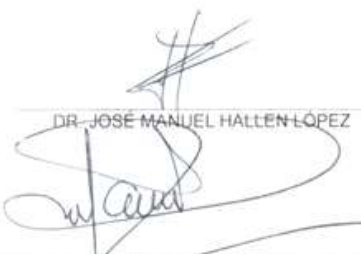
LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

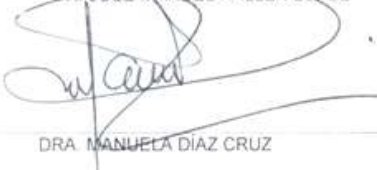


DR. FRANCISCO CALEYO CERREJO





DR. JOSÉ MANUEL HALLEN LÓPEZ



DRA. MANUELA DÍAZ CRUZ



DRA. ELSA MIRIAM ARCE ESTRADA



DR. ROMÁN CABRERA SIERRA

ESCUELA SUPERIOR DE
INGENIERÍA QUÍMICA E
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS
SECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN



DR. JESÚS GÓMEZ SALCEDO

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 28 del mes de Junio el año 2013, el (la) que suscribe Manuel Ramón Madrigal Cano alumno(a) del Programa de Maestría en ciencias en ingeniería metalúrgica, con número de registro A111003, adscrito(a) a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación –E.S.I.Q.I.E., manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del (de la, de los) Dr. Francisco Caleyo Cereijo y Dr. José Manuel Hallen López y cede los derechos del trabajo titulado Estimación de la Confiabilidad Estructural de Ductos en Condiciones de Operación reales en base a la simulación de fluidos, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones mrmcano@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Lic. Manuel Ramón Madrigal Cano.
Nombre y firma del alumno(a)

Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional, que a través de ESIQIE y del Departamento de Metalurgia me proporcionó mi formación académica.

A los Doctores:

Dr. Francisco Caleyó Cereijo,

Dr. José Manuel Hallen López,

Dra. Elsa Miriam Arce Estrada,

Dra. Manuela Díaz Cruz,

Dr. Román Cabrera Sierra,

Dr. Jesús G. Godínez Salcedo.

Por sus comentarios y sugerencias.

Agradecimiento especial al Dr. Francisco Caleyó Cereijo, asesor principal de este trabajo y por el apoyo brindado. Otro agradecimiento, no menos importante, al grupo de trabajo del CIDIM-IPN encabezados por el Dr. José Manuel Hallen López.

Un agradecimiento y reconocimiento a la sociedad mexicana que canalizó su ayuda económica mediante las instituciones de CONACYT e IPN-COFFA.

ÍNDICE

Índice	1
Lista de Gráficas	I
Lista de Tablas	IV
Resumen	V
Abstract	VII
Capítulo 1- INTRODUCCIÓN	1
1.1 Hipótesis y Objetivos	6
1.2 Organización de la Tesis	9
Capítulo 2- FUNDAMENTOS TEORICOS	10
2.1 Clasificación de fallas	10
2.2 Corrosión	13
2.2.1 Inspección de la línea de transporte (ILI).	15
2.3 Simulación de fluidos líquidos en ductos de transporte	18
2.3.1 Golpe de Ariete	20
2.3.2 Método de Caracterización	28
2.4 Confiabilidad estructural	31
2.4.1 Métodos de evaluación de defectos de corrosión	34
2.4.2 Índice de falla	45
Capítulo 3- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	48
3.1 Descripción Técnica del ducto y propiedades del Fluido.	50
3.2 Sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías	51

3.2.1	Modelo del ducto.	53
3.2.2	Presión Estacionaria	56
3.2.3	Simulación de Eventos	58
3.3	Funciones de distribución para las variables de carga.	63
3.4	Información del equipo Instrumentado	65
3.5	Funciones de Distribución para las variables de resistencia	66
3.6	Confiabilidad Estructural	68
3.6.1	Índice de falla en cada sección del ducto	70
Capítulo 4-	RESULTADOS Y ANALISIS EXPERIMENTAL	71
4.1	Presión Estacionaria	71
4.2	Resultados de los Transitorios	76
4.3	Funciones de distribución para los transitorios de presión.	86
4.4	Funciones de Distribución para las indicaciones	115
4.5	Estimación de la Confiabilidad	118
Capítulo 5-	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.	128
Capítulo 6-	CONCLUSIONES	132
	LIMITANTES Y TRABAJOS FUTUROS.	135
	BIBLIOGRAFIA	137

Lista de Gráficas

Gráfica 1.- Trazo Perfil del Oleoducto de 36" D.N.	54
Gráfica 2.- Comparativo del Perfil de Presión estacionaria del Sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías y PEMEX.	57
Gráfica 3.- Muestra la discretización del perfil de alturas del oleoducto.	71
Gráfica 4.- Resultado de la simulación del estado estacionaria	72
Gráfica 5.- Perfil de presiones registradas en campo.	73
Gráfica 6.- Comparativo de presión estacionaria y la discretización de alturas	74
Gráfica 7.- Comparativo de presión estacionaria	74
Gráfica 8.- Presión transitoria	76
Gráfica 9.- Presión transitoria máxima en el km 105 de la simulación 4383.	77
Gráfica 10.- Resultados de la simulación 1387 y 3584	80
Gráfica 11.- Resultados de la simulación 142 y 2339.	81
Gráfica 12.- Resultados de la simulación 1542 y 3739.	82
Gráfica 13.- Resultados de la simulación 1657 y 3854	83
Gráfica 14.- Resultados de la simulación 1677 y 3848	84
Gráfica 15.- Resultados de las simulaciones con tres modos de cierre	85
Gráfica 16.- Resultados de 4394 eventos en km 2.	88
Gráfica 17.- Resultados de 4394 eventos en km 5.	88
Gráfica 18.- Resultados de 4394 eventos en km 9.	88
Gráfica 19.- Resultados de 2883 eventos en km 2.	89
Gráfica 20.- Resultados de 2266 eventos en km 5.	89
Gráfica 21.- Resultados de 2266 eventos en km 2.	89
Gráfica 22.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad en el km 2.	91
Gráfica 23.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad en el km 5.	91
Gráfica 24.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad en el km 9.	91
Gráfica 25.- Resultados de 4394 eventos en km 33.	94
Gráfica 26.- Resultados de 4394 eventos en km 36.	94
Gráfica 27.- Resultados de 4394 eventos en km 41.	94
Gráfica 28.- Resultados de 3324 eventos en el km 33.	96

Gráfica 29.- Resultados de 3324 eventos en el km 36.	96
Gráfica 30.- Resultados de 1831 eventos en el km 41.	96
Gráfica 31.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 33.	98
Gráfica 32.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 36.	98
Gráfica 33.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 41.	98
Gráfica 34.- Resultados de 4394 eventos en km 77.	100
Gráfica 35.- Resultados de 4394 eventos en km 83.	100
Gráfica 36.- Resultados de 4394 eventos en km 90.	100
Gráfica 37.- Resultado de 2668 eventos en el km 77.	101
Gráfica 38.- Resultado de 2668 eventos en el km 83	101
Gráfica 39.- Resultado de 920 eventos en el km 90	101
Gráfica 40.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 77.	103
Gráfica 41.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 83.	103
Gráfica 42.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 90.	103
Gráfica 43.- Resultados de 4394 eventos en el km 99	104
Gráfica 44.- Resultados de 4394 eventos en km el 104	104
Gráfica 45.- Resultados de 4394 eventos en el km 99	104
Gráfica 46.- Resultado de 977 eventos en el km 99.	105
Gráfica 47.- Resultado de 977 eventos en el km 104.	105
Gráfica 48.- Resultado de 990 eventos en el km 109.6.	105
Gráfica 49.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 99.	107
Gráfica 50.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 104.	107
Gráfica 51.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 109.6	107
Gráfica 52.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 13.	108
Gráfica 53.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 17.	108
Gráfica 54.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 21.	108
Gráfica 55.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 25.	108
Gráfica 56.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 47.	109
Gráfica 57.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 53.	109
Gráfica 58.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 59.	109
Gráfica 59.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 69	109

Gráfica 60.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 71.	110
Gráfica 61.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 94.	110
Gráfica 62.- Número de simulaciones sin presiones estacionarias.	111
Gráfica 63.- Comportamiento de la media y Desviación Estándar para las 4,394 simulaciones	114
Gráfica 64.- Distribución estadística de la profundidad de la indicación	116
Gráfica 65.- Distribución estadística de la longitud de la indicación	116
Gráfica 66.- Estimación de la probabilidad de falla bajo el criterio de ruptura	119
Gráfica 67.- Índice de falla para más severas (criterio de ruptura).	121
Gráfica 68.- Estimación de la probabilidad de falla bajo el criterio de fuga grande	122
Gráfica 69.- Índice de falla más severas (criterio de fuga grande)	123
Gráfica 70.- probabilidad de falla, bajo el criterio de fuga pequeña.	125
Gráfica 71.- Índice de falla más severas (criterio de fuga pequeña)	126

Lista de Tablas

Tabla 1.-Descripción estadística de incertidumbres (6).	17
Tabla 2.- Algunos Modelos de Evaluación de Defectos.	39
Tabla 3.- Especificaciones técnicas del ducto analizado(24).	50
Tabla 4.- Propiedades del crudo Istmo (24).	51
Tabla 5.- Estados para las válvulas y Bomba.	61
Tabla 6.- Tabla de probabilidad de los estados	63
Tabla 7.- Resumen de las indicaciones detectadas por el equipo instrumentado en abril del año 2000	65
Tabla 8.- Tipo distribución asociada a la incertidumbre de las variables	66
Tabla 9 .- Comparativo de presiones para la simulación 4383	78
Tabla 10.- Estados involucrados para las simulaciones 1387 y 2384.	79
Tabla 11.- Estados involucrados para las simulaciones 673 y 2870.	80
Tabla 12.- Estados Involucrados para las simulaciones 1657 y 3854.	82
Tabla 13.- Estados involucrados para las simulaciones 1677 y 3848.	83
Tabla 14.- Estados involucrados en las simulaciones.	85
Tabla 15.- Variables para el modelo de falla PCORRC	115
Tabla 16.- Valor para las variables Dimensiones del ducto	116
Tabla 17.- Evolución de la probabilidad de falla anual bajo el criterio de ruptura.	118
Tabla 18.- Índice de falla anual bajo el criterio de ruptura para las indicaciones presentes en el oleoducto de estudio.	120
Tabla 19.- Evolución de la probabilidad de falla bajo el criterio de fuga grande	121
Tabla 20.- Índice de falla para la probabilidad de falla bajo el criterio de fuga grande.	122
Tabla 21.- Evolución de la probabilidad de falla anual bajo el criterio de fuga pequeña	124
Tabla 22.- Índice de falla anual para la probabilidad de falla bajo el criterio de fuga pequeña.	125

Resumen

En los últimos años el porcentaje de fallas en ductos de transporte debidas a la operación incorrecta ha repuntado considerablemente. Entre los factores que influyen en la operación adecuada de los ductos, está el factor humano, el cual se ve involucrado en la manipulación de los componentes estructurales de los mismos.

En el presente trabajo se describe una nueva metodología para estimar la confiabilidad estructural de ductos de transporte tomando como base un sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías. Este sistema permite determinar la distribución estadística de las presiones de operación asociadas a los transitorios de presión que se originan por la operación incorrecta de los componentes estructurales en un sistema de tuberías. La confiabilidad estructural del ducto se estimó utilizando la aproximación de carga-resistencia, en la cual la carga está representada por la presión de operación extrema generada por los transitorios de presión mientras que la resistencia está dada por la presión de falla asociada a la en presencia o no de defectos de corrosión en el ducto. Para estimar la presión de falla se utilizó la ecuación de falla PCORRC, la cual considera que la sección de ducto afectada por corrosión fallará por colapso plástico

Esta metodología permite considerar el impacto de la confiabilidad humana en la confiabilidad estructural de ductos de transporte. También permite modelar y simular de manera cuantitativa los escenarios de riesgo y las medidas de seguridad necesarias para reducir el creciente número de incidentes en ductos de transporte debido a errores de operación de los mismos.

Para ilustrar la aplicación de la metodología propuesta, se estimó la confiabilidad para un oleoducto con un número reducido de accesorios. Los resultados de este ejemplo mostraron que la confiabilidad de este ducto resultó inferior a lo que se considera aceptable para ductos de transporte de hidrocarburos. La metodología muestra que para estimar la confiabilidad estructural de ductos de transporte de hidrocarburos debe

considerarse tanto las condiciones cotidianas, como las condiciones anómalas de operación que se pueden derivar de la manipulación incorrecta de los accesorios de estos ductos. Hasta la fecha no se contaba con las herramientas de modelación y simulación necesarias para considerar dichas condiciones de operación anómalas al momento de estimar la confiabilidad estructural de ductos de transporte.

Abstract

During the last decade, the percentage of failures due to the incorrect operation of transportation pipelines has steadily increased worldwide. The main reason behind this increase, in statistical terms, can be related to the fact that the occurrence of corrosion- and mechanical damage-related pipeline failures has dramatically decreased as the result of the maintenance policies implemented in the oil and gas industry in the past 20-30 years. In spite of their increasingly significance in pipeline safety statistics, operation-related failures are far from being correctly addressed by pipeline design, integrity, and risk management procedures and codes. There is a clear need for new reliability methodologies capable of addressing the threats posed to transportation pipelines by incorrect operation.

In this work a new reliability methodology is presented and illustrated for the estimation of the probability of failure and failure index associated with incorrect operation of corroding transportation pipelines. In the proposed methodology a pipeline (fluid) flow simulation software (AFT Impulse 3.0) is used to determine the statistical distribution of operating overpressures due to hydraulic transient or waterhammer events that result from the inadequate operation of components in a pipeline such as valves and pumps. To obtain such a distribution, a large number of component-manipulation scenarios are simulated using the above referred software. For each one of these scenarios, the resulting stationary and transient pressure profile is simulated along the entire pipeline under analysis. A probability of occurrence is assigned to each simulated profile according to its likelihood over the expected life of the pipeline. At each pipeline section, the distribution of operating pressure that results when all the scenarios are accounted for is used as the distribution of the load, which is later input into a traditional load-resistance reliability methodology.

The resistance of a pipeline section affected by corrosion is given by the pressure that it can sustain or failure pressure. This pressure is computed using the PCORRC failure equation, which is a plastic collapse failure model. The statistical distribution of the failure pressure is estimated from the uncertainty in the variables used to feed PCORRC. The distributions of the load (operating pressure) and resistance (failure pressure) are used to estimate, through Monte Carlo simulations, the probability of failure and failure index of the pipeline under analysis. The time evolution of the pipeline reliability is determined from the expected change in size of the corrosion defects as the pipeline service time increases.

The application of the developed methodology is illustrated for an oil pipeline which, for the sake of simplicity, has a reduced number of components. The results of this illustration example corroborate that the methodology is suitable for considering the anomalous operating conditions that arise from the unexpected, incorrect manipulations of components of transporting pipelines. It is shown that these conditions could unexpectedly compromise the reliability of the pipeline to levels which are considered intolerable for transporting pipelines. This situation can only be evidenced by using the proposed methodology, which allows pipeline integrity analysts not only addressing these otherwise unpredictable reliability issues, but also taking into account other pipeline integrity and risk aspects which are extremely difficult to model, such as human reliability.

Capítulo 1- INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transporte de hidrocarburos por tuberías han resultado ser los más eficientes y seguros para la industria petrolera (1), Lo que ha traído como resultado que en el mundo existan miles de kilómetros de estas tuberías. En México, PEMEX cuenta con más de 30 mil kilómetros de tuberías de transporte para el traslado de hidrocarburos (1). En la actualidad, para la industria petrolera las tuberías de transporte tienen un historial de seguridad aceptable. Esto se debe a una combinación de diversos factores entre ellos: mejores diseños, investigación de nuevos materiales y las mejoras en los procedimientos de supervisión e inspección de las tuberías (2). A pesar de ello, las fallas y accidentes en los ductos ocurren con una frecuencia que dista de ser la óptima. Algunas fallas están asociadas a la pérdida del espesor del ducto debido a la corrosión, otras fallas son generadas por interferencias externas, muchas de ellas relacionadas con desastres naturales o sabotajes. Las fallas más comunes se refieren a la operación de los ductos, errores en los diseños de las tuberías y en la manufactura de los materiales. Las fallas deben de ser tomadas en cuenta muy seriamente ya que generan pérdidas económicas, daños irreparables al medio ambiente y el riesgo de perder vidas humanas(2).

Las causas de fallas en las tuberías de transporte dependen de diversos factores y las frecuencias con que se presentan no pueden ser establecidas cuantitativamente con total certeza(2). No obstante, tomando en cuenta los datos históricos en los escenarios de fallas y su probabilidad de ocurrencia, las causas de falla más comunes que se presentan en la industria petrolera son las asociadas a la corrosión. Adicionalmente, los errores relacionados a la operación de las tuberías de transporte han repuntado en los últimos años (3). Dentro de los factores que influyen la operación de los ductos, está en gran medida el factor humano que se ve involucrado en la manipulación de los componentes estructurales del ducto. Por supuesto, la falta de mantenimiento y los factores externos también influyen. En los sistemas de transporte mexicanos las causas de falla más comunes

están relacionadas con la corrosión. Cerca del 65% (4) de las fallas se asocian a la corrosión externa. Bajo estas circunstancias el mantenimiento de los ductos en operación es de suma importancia (5).

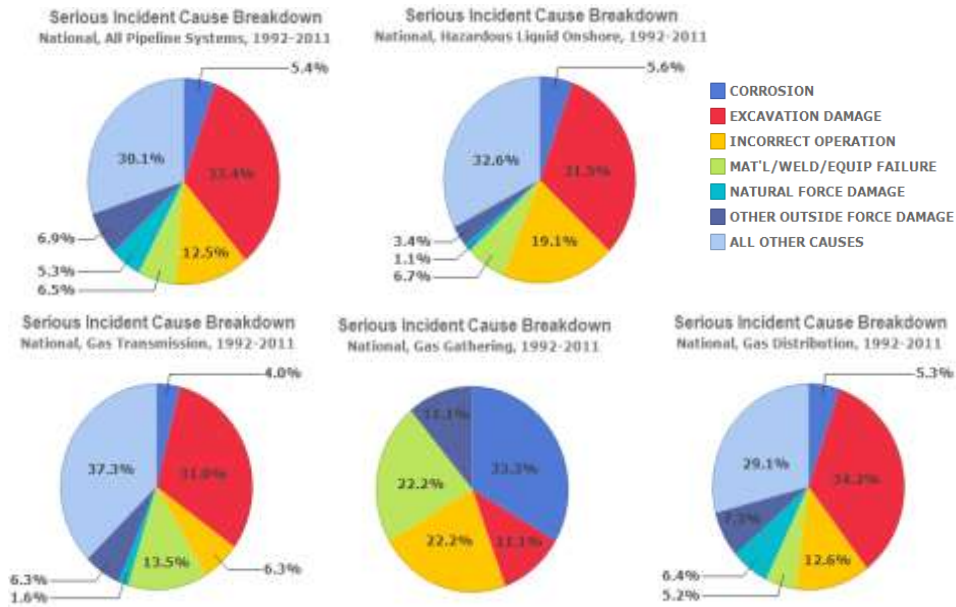


Fig. 1.- Estadísticas de falla en Estados Unidos de 1992- 2012 (3)

Las herramientas de inspección constituyen la técnica más eficaz para conocer el estado físico de los ductos y permiten obtener datos que redundan en la confiabilidad estructural, integridad, seguridad operativa, así como en el control de la velocidad de corrosión (5).

El utilizar los Análisis de Confiabilidad Estructural enfocado a evaluar la integridad de ductos con corrosión, ha adquirido una gran importancia en la industria petrolera y ha sido de gran utilidad para establecer métodos que ayudan el mantenimiento y rehabilitación de los mismos (6). El uso de la probabilidad de falla como medida de la confiabilidad estructural de ductos ha traído un gran beneficio debido a que permite considerar la incertidumbre asociada a la velocidad de corrosión, geometría de la tubería, propiedades del material y a la presión de operación. Considerando un periodo de tiempo razonable, estas variables se pueden modelar estadísticamente para así obtener una medida cuantitativa de la Incertidumbre asociada a las mismas (6) . Una vez que se cuenta

con la Información anterior esto permite definir la confiabilidad estructural en ductos como la probabilidad de que un ducto no falle en un periodo de tiempo determinado, lo que implica estimar la probabilidad de que el ducto falle en dicho período de tiempo. La probabilidad de que el ducto falle, se le conoce como probabilidad de falla.

Existen dos métodos usados en la industria petrolera para estimar la probabilidad de que el ducto falle. El primero utiliza la estimación basada en el historial de fallas (7)(8). Este método se emplea en sistemas que presentan índices de fallas altos, lo cual permite almacenar un historial de fallas que hacen posible el análisis estadístico. El segundo método está basado en estimar los datos de la condición en que se encuentra el ducto, analizando las variables carga-resistencia(7)(8). La carga se puede asociar a la presión de operación estacionaria o transitoria a la que está sometido el ducto. La resistencia se puede asociar a la presión de falla estimada para el ducto de acuerdo a variables como sus dimensiones, resistencia mecánica y tamaños de los defectos. Este método tiene como premisa el hecho de que las fallas son el resultado de una situación donde la carga (Presión de operación) aplicada excede la resistencia (Presión de falla) (7).

Los diseños de las tuberías de transporte para operar bajo presiones generadas en estado estacionario, involucran conceptos bien establecidos y fáciles de entender(9). Ahora bien, si se consideran los factores que incrementan la presión en el interior del ducto, los escenarios relativos a la integridad mecánica de los ductos cambian considerablemente debido a que el flujo del fluido es totalmente diferente y los conceptos que explican el cambio en el flujo adquieren mayor complejidad.

Un problema ingenieril de suma importancia relacionado con las tuberías de transporte, es el asociado al aumento súbito de presión en el interior de la tubería de transportes (9). Este incremento puede ser generado al realizar cambios intencionales o no a los componentes estructurales de la tubería. En la mayoría de los casos los cambios de presión son causados por la operación en bombas o la operación accidental en la apertura o cierre de válvulas (9)(3). Si los diseños son adecuados, pero los procedimientos de

operación no son los apropiados, no es posible mantener la seguridad de la tubería en servicio. Los transitorios de presión que se generan durante el transporte del hidrocarburo pueden fácilmente exceder los rangos de operación segura de la tubería y causar fallas inesperadas (9).

Un análisis de un sistema de tuberías de transporte que anticipe las magnitudes o posibles incrementos de presión en el interior de la tubería es mucho más complicado que cuando se hace un análisis con las presiones en estado estacionario. Algunos procedimientos para el funcionamiento seguro de las tuberías de transporte se basan en el análisis de las presiones estacionarias (7) (10). Como resultado, en ocasiones las tuberías de transporte han fallado inesperadamente debido a la ocurrencia de transitorios de presión (9).

Los transitorios de presión están relacionados directamente con las condiciones de operación o eventos no cotidianos que se generan durante la operación de los ductos de transporte. En la actualidad no existe algún método de confiabilidad estructural que considere el incremento súbito de la presión al interior del ducto (9). Los métodos de confiabilidad existentes toman en cuenta únicamente las presiones de operación que se generan en el estado estacionario (7).

En el presente trabajo se propone y valida una nueva metodología para el análisis de la confiabilidad estructural de ductos, considerando los transitorios de presión debido a acciones de operación incorrecta de los mismos. La metodología propuesta se basa en la utilización de un sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías que pueda simular una gran cantidad de eventos de operación cotidianos y extremos. Su aplicación se presenta para un oleoducto previamente sometido a una inspección con equipo instrumentado. El objetivo es conocer las presiones que se generan al interior del ducto y poder identificar el tipo de distribución estadística de la presión de operación en el mismo, haciendo énfasis en los transitorios de presión que se presentan. La presión de falla de cada tramo del ducto se determina usando la información de las dimensiones de cada defecto de corrosión reportada por la inspección con equipo instrumentado y con la

ayuda de un modelo de falla de cada tramo de ducto que contienen defectos de corrosión. Con la simulación por el método de Monte Carlo se estima la probabilidad de falla lo que permitirá conocer la confiabilidad del ducto y, finalmente, el índice de falla anual del mismo (11).

La necesidad de esta investigación nace del hecho de que hasta la fecha no existe ninguna metodología de confiabilidad estructural de ductos que permita estimar la probabilidad e índice de falla de los mismos para condiciones de operación anómalas. Estas condiciones generan transitorios de presión (carga) en el ducto que no pueden ser previstas por ninguna prueba de campo porque dichas pruebas podrían precisamente provocar fallas. Sin embargo, la utilización de sistemas de simulación de fluidos, conjuntamente con los resultados de las inspecciones en línea, brinda una herramienta ideal para la estimación de la confiabilidad de ductos. Esto debido a condiciones de operación anómalas. Estas simulaciones permiten además considerar el impacto de la confiabilidad humana sobre la confiabilidad estructural de los sistemas de ductos, debido a que los errores de operación que generan los transitorios de presión son originados principalmente por errores humanos.

1.1 Hipótesis y Objetivos

Como hipótesis de este trabajo se establece que, con la ayuda de un sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías es factible simular la manipulación de los componentes estructurales que se presenta de forma cotidiana o extrema durante el tiempo de servicio de un ducto. Si se considera y modela la presencia de corrosión en los ductos, conjuntamente con la manipulación de los componentes estructurales del mismo que pueden generar transitorios de presión, entonces es posible llevar a cabo análisis de confiabilidad estructural de los ductos. Se podrá establecer una metodología para estimar la confiabilidad del ducto, o de un sistema de ductos, en presencia de tramos afectados por corrosión y reducir así el número esperado de fallas.

Para validar la hipótesis se plantea el siguiente objetivo:

- Establecer una metodología para la estimación de la confiabilidad estructural de ductos de transporte de hidrocarburos para condiciones de operaciones cotidianas y extremas que puedan producir presiones transitorias en las tuberías de transporte.

Se establecen los siguientes objetivos particulares.

- Mediante la simulación de fluidos, estimar las presiones de operación (carga) para los eventos simulados en un conjunto suficientemente grande de eventos de operación en un ducto.
- Establecer el tipo de distribución que generan las presiones de operación transitorias, a partir de las condiciones de operación anómalas de los ductos analizados.
- Estimar las presiones de falla (resistencia) de las secciones de tuberías con defectos de corrosión, utilizando un método de cálculo de la presión de falla de establecido en la industria, como el PCORRC.

Determinar la confiabilidad estructural del ducto, expresada a través de la probabilidad e índice de falla para los modos de falla ruptura, fuga grande y fuga pequeña.

Para la validación de la metodología que se propone se utilizó un oleoducto de 36 pulgadas de diámetro con una longitud aproximada de 109.6 km. Este oleoducto, fue construido y puesto en operación en 1980 para el transporte de Crudo Istmo. Se realizaron 4,394 simulaciones, utilizando un sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías, para las condiciones de operación anómalas del ducto que provocan transitorios de presión. Estas simulaciones contemplan los tiempos y modos de cierre de las válvulas, así como el apagado de bombas. Las simulaciones se realizaron con la ayuda del sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías llamado AFT Impulse, en su versión 3.0.

Se observaron incrementos considerables en la presión interna del ducto, todos clasificables como transitorios, debido al manejo de los elementos estructurales del mismo. El análisis se hizo para 23 secciones del ducto encontrando que los transitorios de presión se distribuyen estadísticamente como una función de distribución Logarítmica-Normal en los kilómetros iniciales. A medida que los transitorios de presión se aproximan a la primera válvula la distribución estadística de los transitorios de presión se ajusta a la distribución Normal. En la cercanía de la segunda válvula, los transitorios de presión tienen una distribución Generalizada de Valores Extremos. Al final del ducto los transitorios se ajustan a una distribución del tipo Weibull. Estas distribuciones constituyen la carga a la cual está sometido el ducto como resultado de todos los posibles escenarios de operación, tanto normales como anómalos.

La inspección con equipo instrumentado reportó 5,896 indicaciones del tipo pérdida de metal debido a corrosión interna y externa. La profundidad máxima de los defectos de

corrosión fue del 78% con respecto al espesor de pared del ducto y la longitud máxima encontrada para estos defectos fue de 2,044 mm. Se utilizó la simulación de Monte Carlo para estimar la probabilidad de falla en base al modelo de confiabilidad carga-resistencia. La presión de falla de cada tramo de tubería se determinó utilizando el modelo PCORRC, el cual es un modelo de falla basado en el concepto de colapso plástico.

Se estimaron las probabilidades de falla anual para un periodo de tiempo de 10 años. Los resultados con mayor significado para la probabilidad de falla debido a la ruptura se presentaron en la sección seis (km 17 al km 21). En dicha sección, se obtuvieron índices de falla que van de $1.0 \times 10^{-5} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$ a $4.2 \times 10^{-4} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$ valores que sugieren que se debe prestar atención a las condiciones de integridad que se presentan en esta sección. En combinación con los transitorios de presión de operación estimados para esta sección, la presencia de los defectos de corrosión pone en riesgo la integridad del ducto, por encima de lo que se considera el riesgo máximo tolerable para ductos (12).

La mayor probabilidad de falla debido a una fuga grande, se presentó en la sección 23 (km 104 al km109.6), lo que generó un índice de falla en el decimo año de $9.9 \times 10^{-3} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$.

Al estimar la probabilidad de falla bajo el criterio de fuga pequeña, el índice de falla máximo se presentó en la sección 21 (km 94 al km 99), con un valor de $1.6 \times 10^{-4} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$ para un lapso de tiempo de 10 años.

Este trabajo pone en evidencia que la existencia de transitorios al interior del ducto en combinación con los defectos de corrosión, tiene un impacto en el aumento de la probabilidad de falla y por consecuencia una reducción en la confiabilidad.

1.2 Organización de la Tesis

Capítulo 1: Se presenta la problemática del trabajo. Se establecen los objetivos que pretende seguir el trabajo y se exhiben los resultados más significativos.

Capítulo 2: Se presentan los fundamentos teóricos en los cuales se sustenta el trabajo. Se menciona de forma breve cuales son las bases teóricas que usa el sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías

Capítulo 3: Se describe el procedimiento experimental, así como la metodología para el desarrollo de esta tesis.

Capítulo 4: Se presentan los resultados que arroja al simular la manipulación de los componentes estructurales del ducto. Se describen los resultados de la presión de falla para el ducto mediante el método de PCORR. Por último se muestran los resultados de la estimación de la confiabilidad del ducto analizado.

Capítulo 5: Se analizan y discuten los resultados de la aplicación de la metodología propuesta.

Capítulo 6: Se presentan las conclusiones del trabajo y se discuten las limitaciones de la metodología, se sugieren ideas para trabajos posteriores encaminados a solventar dichas limitaciones.

Capítulo 2- FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 Clasificación de fallas

Las fallas en las tuberías de transporte como gasoductos y oleoductos ocurren cuando la presión interna en el ducto excede la resistencia del material. Se puede decir de manera general que los mecanismos de fallas se clasifican en dependientes e independientes del tiempo (2). Una falla puede ocurrir tempranamente durante el ciclo de la vida de la estructura por errores en el diseño, al momento de la construcción, por las propiedades del material o inducido por fenómenos naturales(2). Las fallas dependientes del tiempo están asociadas con mecanismos de crecimiento de pérdidas de metal por corrosión, fisuras, corrosión bajo tensión y desgaste, entre otros(2).

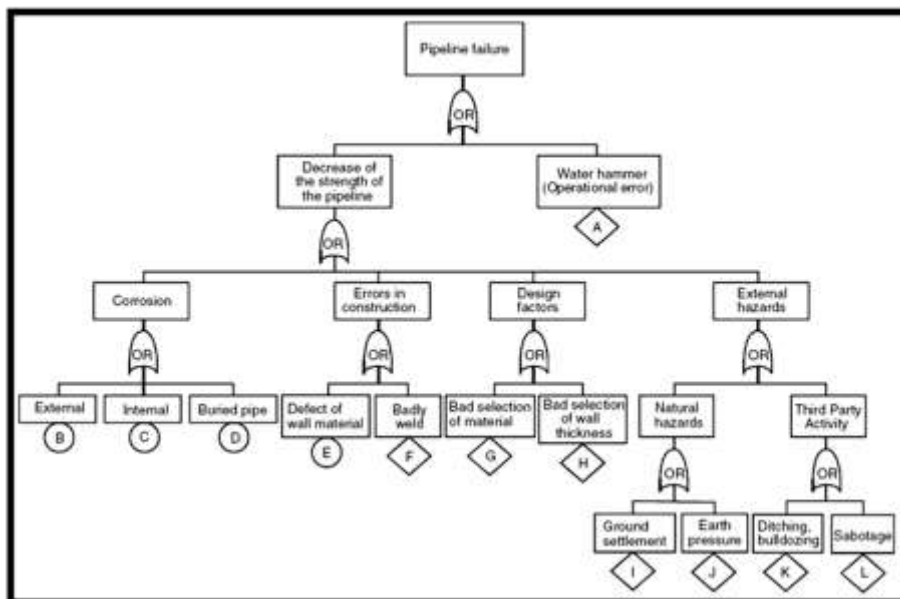


Fig. 2.-Diagrama de fallas para ductos de transporte (2).

Las frecuencias de falla en ductos de transporte dependen de diversos factores que muchas veces no pueden ser establecidos cuantitativamente. Sin embargo, tomando en cuenta los datos históricos de escenarios de falla, así como de probabilidades de

ocurrencia, se han podido establecer tablas y diagramas que muestran las causas más probables de falla y se presentan en el diagrama de árbol de la Fig. 2.

Una de las causas de falla durante la operación de los ductos se debe a los errores de operación de los componentes estructurales, los cuales generan grandes incrementos de presión al interior del ducto(9). Muchos de los errores de operación se atribuyen al humano ya que está directamente relacionadas con la manipulación de los componentes estructurales (cierre y apertura de válvulas, encendido y/o apagado de bombas) del ducto(2).

En los últimos 20 años en Estados Unidos la operación incorrecta de los ductos de transporte ha ido en aumento. Esto se debe a que la industria petrolera ha atendido de manera significativa las situaciones que originan el decremento en la resistencia del material del ducto, por ejemplo la corrosión(3). La reducción de fallas relacionadas con la corrosión ha originado que los errores en la operación se hagan presentes con mayor frecuencia en las estadísticas de incidentes recientes (veas Fig. 1 del capítulo 1). Al presentarse hoy en día los errores en la operación con mayor frecuencia, es necesario e importante identificar anticipadamente las consecuencias que dichos errores pueden generar.

En la Fig. 1 que se encuentra en el capítulo 1, se puede observar que la causa principal sigue siendo la corrosión, seguida por los daños de excavación y en tercer lugar la operación incorrecta. Se estima que en el periodo comprendido de 1992-2011 los daños por corrosión generaron pérdidas de alrededor de 558 mil millones de dólares (3). Por otro lado, para el mismo periodo de tiempo, la operación incorrecta en los ductos generó más de 123 mil millones de dólares en pérdidas (véase Fig. 3).

National All Pipeline Systems: All Reported Incident Details: 1992-2011

Reported Cause of Incident (A)	Number	%	Fatalities	Injuries	Property Damage (B) (C)	% of Property Damage
CORROSION						
EXTERNAL CORROSION	196	7.7%	10	69	\$128,047,027	5.8%
INTERNAL CORROSION	753	7.3%	13	6	\$221,912,832	4.8%
UNSPECIFIED CORROSION	291	2.8%	1	11	\$8,343,845	0.1%
Sub Total	1,839	17.9%	24	86	\$358,303,704	10.8%
EXCAVATION DAMAGE						
OPERATOR/CONTRACTOR EXCAVATION DAMAGE	229	2.2%	1	59	\$39,392,456	0.7%
THIRD PARTY EXCAVATION DAMAGE	1,725	16.7%	143	468	\$379,072,835	6.8%
PREVIOUS DAMAGE DUE TO EXCAVATION	8	0.0%	0	0	\$1,314,142	0.0%
UNSPECIFIED EXCAVATION DAMAGE	59	0.5%	4	5	\$27,438,182	0.5%
Sub Total	2,022	19.6%	148	532	\$447,214,815	8.0%
INCORRECT OPERATION						
DAMAGE BY OPERATOR OR OPERATOR'S CONTRACTOR	7	0.0%	1	1	\$340,523	0.0%
OVERFILL/OVERFLOW OF TANK/VESSEL/PUMP	20	0.1%	0	0	\$29,567,926	0.5%
INCORRECT VALVE POSITION	24	0.2%	0	0	\$3,133,592	0.0%
PIPELINE/EQUIPMENT OVERPRESSURED	15	0.1%	0	0	\$6,584,424	0.1%
INCORRECT INSTALLATION	12	0.1%	0	1	\$1,298,689	0.0%
OTHER INCORRECT OPERATION	23	0.2%	1	16	\$21,808,277	0.2%
UNSPECIFIED INCORRECT OPERATION	594	5.7%	18	155	\$8,171,701	1.1%
Sub Total	694	6.7%	18	173	\$121,878,132	2.2%
MAT'L/WELD/EQUIP FAILURE						
CONSTRUCTION, INSTALLATION OR FABRICATION-RELATED	51	0.5%	0	0	\$21,696,580	0.2%
MANUFACTURING-RELATED	27	0.2%	8	51	\$390,039,809	7.0%
ENVIRONMENTAL CRACKING-RELATED	29	0.2%	0	3	\$23,219,753	2.2%
BODY OF PIPE	75	0.7%	2	18	\$44,031,097	0.8%
PIPE SEAM	65	0.6%	3	7	\$77,672,557	1.4%
UNSPECIFIED PIPE BODY OR SEAM	94	0.9%	0	2	\$82,202,052	1.4%
BUTT WELD	67	0.6%	0	0	\$46,064,689	0.8%
FILLET WELD	29	0.2%	0	0	\$21,683,064	0.3%
UNSPECIFIED WELD	93	0.9%	0	0	\$21,731,126	0.2%
FUSION JOINT	2	0.0%	0	0	\$651,828	0.0%
COMPRESSION FITTING	1	0.0%	0	0	\$43,267	0.0%
MECHANICAL FITTING	4	0.0%	1	1	\$799,496	0.0%
JOINT/FITTING/COMPONENT	202	1.9%	2	7	\$89,911,216	1.2%
OTHER PIPE/WELD/JOINT FAILURE	1	0.0%	0	1	\$138,500	0.0%
UNSPECIFIED MAT'L/WELD FAILURE	136	1.3%	0	0	\$1,951,771	0.0%
PUMP/COMPRESSOR-RELATED EQUIPMENT	3	0.0%	0	0	\$439,928	0.0%
MALFUNCTION OF CONTROL/RELIEF EQUIPMENT	303	2.9%	1	4	\$25,132,311	0.4%
PUMP/COMPRESSOR-RELATED EQUIPMENT	77	0.7%	0	0	\$1,843,732	0.0%

Fig. 3.- Consecuencias debido a las fallas en ductos de transporte (3).

2.2 Corrosión

Como se ha visto anteriormente en múltiples estudios que se han hecho, la corrosión es uno de los principales problemas para la industria del petróleo. Es por esta razón que es necesario detenerse un poco para hablar de ella. La mayoría de los libros definen a la corrosión como el deterioro del material por el efecto del medio en el que se encuentra, en el que se involucra un proceso electroquímico. La corrosión también es definida como un proceso natural en el cual se produce una transformación del elemento metálico a un compuesto más estable en forma de óxido (13).

Una gran cantidad de medios son corrosivos en mayor o menor grado, la corrosión en la industria petrolera se debe en su mayoría a la presencia de cloruro de sodio, sulfuros, ácidos clorhídricos y sulfúricos y agua (13). Sin embargo, las condiciones de corrosión más severas están asociadas con las altas temperaturas.

Las pérdidas económicas debido a la corrosión pueden ser directas o indirectas. Las pérdidas directas están relacionadas, por ejemplo, con el reemplazo de la parte dañada y las pérdidas indirectas tiene que ver con los paros de producción, pérdidas de producto, contaminación por los derrames, etc. Otras causas de pérdidas económicas se deben al sobredimensionamiento en el diseño de los ductos, derivado de la falta de información sobre la corrosión de los componentes en un ambiente determinado. La corrosión en ductos de transporte ha generado grandes pérdidas tanto económicas como de vidas humanas. Conocer la corrosión conforme a su apariencia ayuda a su prevención y mantenimiento. La Fig. 4 muestra una clasificación de la corrosión mediante su apariencia.

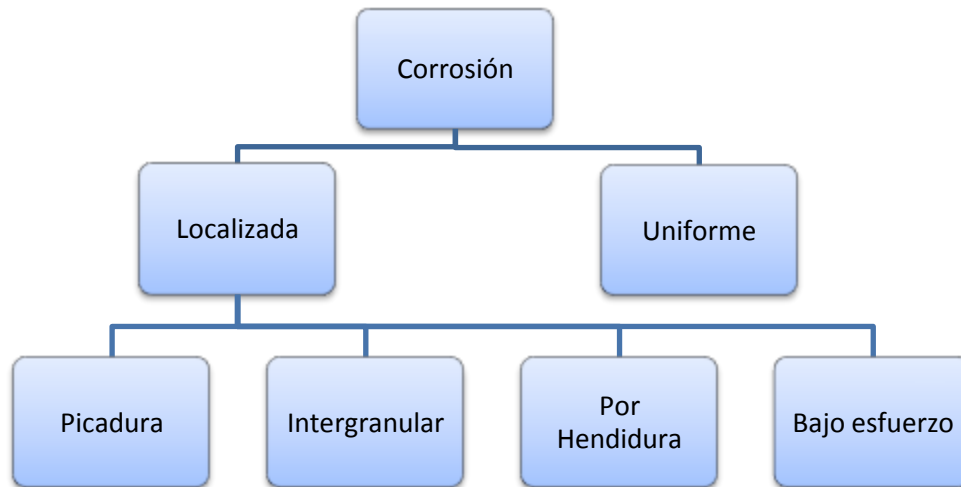


Fig. 4.- Clasificación de la corrosión mediante su apariencia (13).

La corrosión localizada es la que mayor problema causa en los ductos de transporte ya que se inician de forma microscópica y por ende es difícil de detectar. Muchas veces las pérdidas de metal son cubiertas por los mismos productos de corrosión provocando fallas inesperadas. Gran cantidad de los problemas de corrosión se deben a más de un tipo de corrosión que actúan simultáneamente, por ejemplo, la corrosión por picadura puede causar corrosión por hendidura.

Hace 10 años en México la principal causa de falla estaba asociada a la corrosión con cerca del 65% del total de las causas y el resto se refería a daños mecánicos, geotécnicos y de soldadura entre otros (6). Hoy en día esas causas han disminuido por la oportuna atención que se presta a los ductos de transporte, considerando de manera muy importante el mantenimiento y rehabilitación de los ductos con corrosión.

Los defectos de corrosión que se presentan en el exterior del ducto aumentan de tamaño debido al proceso de corrosión y asumir que presentan un modelo lineal de crecimiento para predecir su tamaño es de gran utilidad en la industria del petróleo. A continuación se presentan algunos de los modelos que comúnmente son usados en la industria para el crecimiento de los defectos de corrosión.

$$d(t) = d_o + V_c t$$

1

$$L(t) = L_o + V_c t$$

L : Longitud del defecto. d : Profundidad del defecto. V_c : Velocidad de corrosión. t : Tiempo.

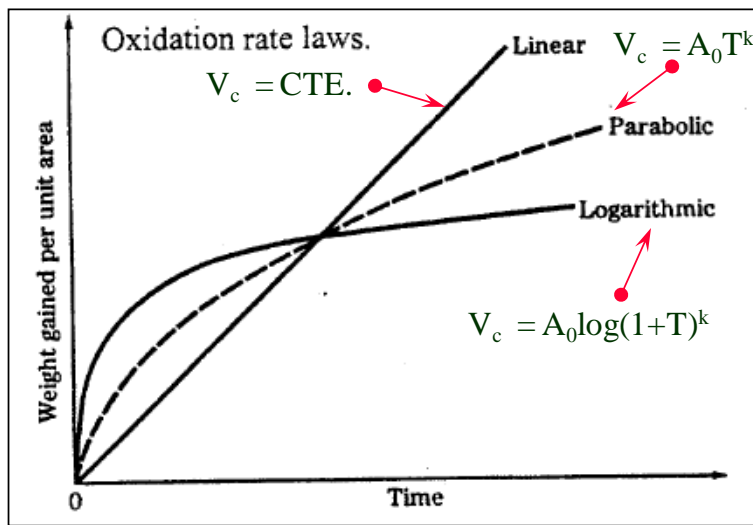


Fig. 5.-Modelos de pérdidas de metal por corrosión (14).

2.2.1 Inspección de la línea de transporte (ILI).

La industria del petróleo, motivada por identificar el tipo y tamaño de la corrosión presentes en los ductos, requirió desarrollar una herramienta que ayudara a inspeccionar las líneas de transporte para saber cuáles eran las condiciones físicas después de un periodo de tiempo en servicio(15). El equipo instrumentado es un dispositivo mecánico electrónico de inspección automatizada. Es la herramienta de inspección más usada y comúnmente es conocido como diablo inteligente. Debido a su versatilidad y relativamente alta exactitud y precisión, la inspección en línea resulta muy útil para obtener la información del estado físico del ducto en servicio y diseñar los programas de mantenimiento y rehabilitación (5).

El equipo instrumentado ha evolucionado para brindar una mejor resolución de la localización y características de los daños y defectos en el ducto, inspeccionando las superficies internas y externas. Además proporciona información relacionada con las características del ducto como lo es la longitud, espesor y diámetro. Dicha inspección, permite obtener datos que son necesarios para estimar la confiabilidad y también permite conocer y controlar la velocidad de corrosión. PEMEX dentro de su norma NRF-060-PEMEX-2006, pide que la inspección en el ducto de transporte detecte pérdidas de material en la base interna o externa ya sea localizada y/o generalizada, mostrando la cantidad de defectos que se encuentran a lo largo del ducto, además de otras anomalías.

La inspección en línea (ILI, por sus siglas en inglés) tiene asociada errores de medición de la profundidad del defecto, los cuales se expresan a través del valor máximo de error asociado a una confianza dada (ver Fig. 6). Este margen de error está relacionado con la capacidad del equipo de detección de indicaciones a lo largo de la tubería de transporte y es de un $\pm 10\%$ en el 80% de los casos; es decir, de cada 100 defectos ubicados por la inspección en línea, 80 defectos tienen un error de $\pm 10\%$ con respecto a su valor real, y el error asociado a los defectos restantes es mayor al $\pm 10\%$. En otras palabras, en un rango $\pm 1.28\sigma$ de una Distribución Normal que describe la diferencia entre los valores reales y medios de profundidad se encuentra el 80% de las mediciones que detecta la inspección con equipo instrumentado (16).

Ultrasonido:

HR UT: ± 0.6 mm con 80% de confianza
 XHR UT: ± 0.3 mm con 80% de confianza

MFL :

HR MFL: $\pm 10\%$ WT con 80% de confianza
 XHR MFL: $\pm 5\%$ WT con 80% de confianza

HR = High resolution
 XHR = Extra high resolution
 WT = Wall thickness

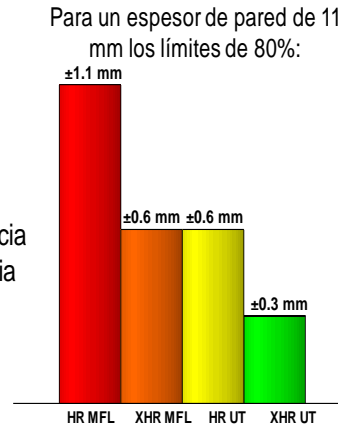


Fig. 6.- Errores en la Inspección de línea(16).

Si bien la inspección con equipo instrumentado tiene asociado un error en las indicaciones que dimensiona, también las características del ducto como la longitud, diámetro, espesor, así como las propiedades mecánicas y la velocidad de corrosión tienen asociado una incertidumbre intrínseca (16) . La incertidumbre de las variables antes mencionadas es descrita por una función de densidad de probabilidad y se presenta en la Tabla 1 para cada una de ellas.

	Variable	Tipo	Covarianza	Fuente
Ducto	Diámetro D	Normal	0.06%	Fab. o Liter.
	Espesor t	Normal	1.00%	Fab. o Liter.
	Cedencia YS	Log-normal	3.50%	Fab. o Liter.
Indicac.	Profundidad d_0	Normal	7.00%	CIDIM
	Longitud L_0	Normal	20.00%	CIDIM
Operac.	V. corrosión v_c	Weibull	10 .00%	CIDIM
	P. operación P_{op}	Gumbel	5.00 %	Registro oper.

Tabla 1.-Descripción estadística de incertidumbres (6).

CIDIM: Convenio de Investigación y Desarrollo de Integridad Mecánica –IPN.

2.3 Simulación de fluidos líquidos en ductos de transporte

El diseño de los sistemas de transporte de hidrocarburos es un proceso complejo que involucra mucho más que sólo el hecho de saber del tamaño del ducto que se requiere. Se debe de considerar otros factores como el medio ambiente, la sociedad y aspectos económicos (9). La simulación de fluidos es el proceso que involucra crear un modelo de un sistema real para simular su comportamiento. Esto, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema respetando la conservación de la masa, cantidad de movimiento y continuidad del flujo, fases que se presentan durante el análisis del flujo de fluidos, etc.(9).

Existen dos clasificaciones para el flujo de fluidos: laminar y turbulento. El flujo laminar puede ocurrir si el líquido es altamente viscoso o si las velocidades son bajas. Con el flujo laminar el fluido se mueve en láminas paralelas sin perturbación y cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave llamada línea de corriente. Con el flujo turbulento hay una mezcla entre las capas del fluido(17).

El número de Reynolds delimita si el flujo será laminar o turbulento. Este parámetro está definido como:

$$Re = \rho \frac{Vd}{\mu} = \frac{Vd}{\nu} \quad 2$$

Para un líquido que viaja en un tubo, V es la velocidad media del fluido, D el diámetro del tubo, ρ la densidad del fluido, μ la viscosidad dinámica y ν la viscosidad cinemática. Si el número de Reynolds (Re) cumple, $Re < 2000$, entonces el flujo será laminar. Por otra parte, si el número de Reynolds está entre 2000 y 4000 el flujo es inestable, para números de Reynolds Re mayores que 4000 el flujo es completamente turbulento(9) (17).

El flujo de fluidos puede ser clasificado como uniforme o no-uniforme, estable o inestable. La uniformidad se refiere a las variaciones espaciales, un ejemplo de flujo uniforme sería

el flujo de un fluido en un tubo recto de diámetro constante. Y un ejemplo de flujo no-uniforme ocurre cuando hay un cambio de dirección del flujo (9).

El flujo estable, implica que en cualquier punto en el sistema las condiciones no varían con el tiempo. El flujo inestable puede estar subdividido de acuerdo al índice en el que la velocidad y la presión varían.

Si un rápido cambio ocurre en la velocidad del fluido, debido por ejemplo al cierre súbito de una válvula, se generan ondas de presión, las cuales se transmiten a lo largo de ducto a la velocidad del sonido. Tal súbito cambio en la velocidad resulta en un incremento de la presión a lo largo del ducto. A este tipo de inestabilidad se le conoce como golpe de ariete o transitorios de presión(9).

El transitorio de presión es un término general que se refiere a alguna inestabilidad del flujo en ductos. Los transitorios en tuberías cerradas hacen que las velocidades del flujo cambien rápidamente, por ejemplo, el cierre rápido de una válvula. Cuando la válvula es cerrada de forma rápida, la fuerza necesaria para romper el momento inicial del líquido en movimiento causa una alta presión. Esta presión es transmitida a lo largo del ducto a la velocidad del sonido y puede rápidamente involucrar a toda la tubería incrementando su presión interna (9) (17).

El cierre de válvulas, la operación de bombas y el movimiento de aire al interior del ducto, son causas típicas que generan golpes de ariete. La importancia de considerar los transitorios de presión radica en que éstos son responsables de muchas fallas inesperadas en los ductos de transporte. Un ducto que presenta, aún en la presencia de defectos de corrosión, una condición de integridad, confiabilidad y riesgo aceptable en condiciones de operación estacionarias, puede fallar cuando ocurre un transitorio de presión debido a que su resistencia remanente puede ser inferior a la carga impuesta en el ducto por el incremento súbito de presión originado por el transitorio (9).

2.3.1 Golpe de Ariete

El término transitorio de presión en ductos de transporte, se refiere a la situación donde las condiciones del flujo del fluido son inestables debido a un cambio de dirección, reducción de la tubería de transporte o la operación súbita de los componentes estructurales del ducto. Hay registros de ductos, bombas, válvulas y turbinas que han fallado o colapsado debido a la presencia de los transitorios de presión(9) (18).

Los transitorios de presión pueden ocurrir en ductos que transportan tanto gases como líquidos y este término es comúnmente usado para abarcar ambas situaciones. Cuando este fenómeno ocurre en líquidos, el término más usado es el de *golpe de ariete* (9) (17) (18).

Cuando se presentan los cambios en la velocidad y consecuentemente en la presión, ocurre tanto la compresibilidad del líquido como la deformación elástica del ducto(9). Cuando se requiere hacer un análisis que involucre los incrementos de presión a lo largo del ducto, se establece una ecuación diferencial cuya solución da respuesta a los transitorios de presión.

Algunos eventos más comunes que pueden generar golpes de ariete son, cambios en los cierres de válvulas, paro de bombas, reducción de diámetros, cambio en la potencia de bombas y aumento o reducción de la presión al interior del ducto (9)(17) (18). Todas las tuberías experimentan golpes de ariete y esto puede conllevar a que el ducto falle. Sin embargo, la respuesta ante un transitorio de presión depende en gran medida de las propiedades mecánicas de los ductos para tolerar altas presiones. Es por esto que se recomienda que cada ducto tenga un análisis de transitorios de presión para salvaguardar así la integridad durante el tiempo de vida para el cual fue diseñado.

2.3.1.1 Ecuaciones básicas de los transitorios de presión

Una ecuación que predice el incremento ΔH causado por un repentino cambio de velocidad $\Delta V = V_2 - V_1$ puede ser obtenida por la aplicación de la ecuación de momento para un volumen control de una sección del ducto donde el cambio del flujo está ocurriendo. Considérese un ducto horizontal entre un contenedor y una válvula de control como se muestra en la Fig. 7. Ignorando la fricción, el estado estacionario de este sistema se representa por la línea horizontal que se encuentra en la parte superior del recipiente, la cual es modificada cuando la válvula interactúa (9) (18).

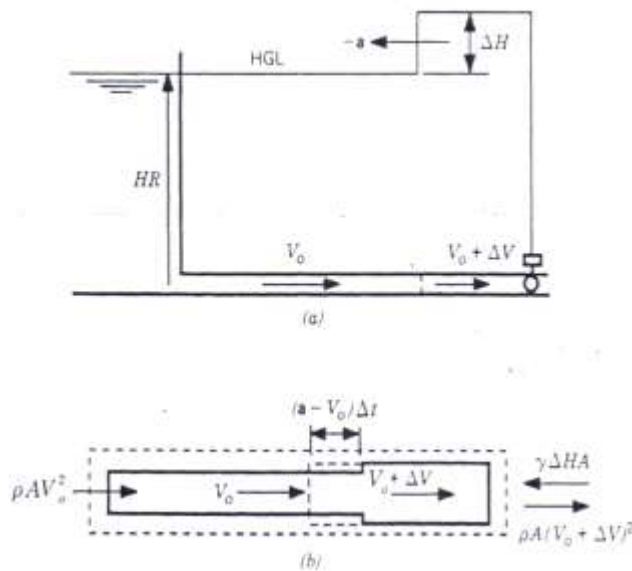


Fig. 7.- Control de volumen para una válvula que cierra (9).

Si se considera el caso de cierre de la válvula, el fluido más próximo a la válvula se detendrá bruscamente y será empujado por el que viene detrás, por lo que el fluido empezará a comprimirse en las proximidades de la válvula. El resto del líquido comprimirá al que le precede hasta que su velocidad se reduzca por una cantidad ΔV . Esta compresión se va trasladando hacia el origen conforme el fluido se va comprimiendo. La reducción de la velocidad puede sólo ser lograda por un incremento en la presión aguas arriba con respecto a la válvula. La energía cinética que lleva el fluido se transforma en energía elástica de compresión. Cuando el fluido se detiene, ha agotado su energía cinética y se

inicia la descompresión, lo cual crea una onda de presión de magnitud ΔH que viaja a lo largo del ducto a la velocidad del sonido a como se muestra en la Fig. 7. El incremento en la presión comprime al líquido y expande el ducto. La expansión del ducto y el incremento en la densidad del fluido son pequeños y, comparados con otros cambios, pueden ser despreciables. Las fuerzas que actúan sobre el control del volumen en la dirección positiva del flujo es $-\gamma\Delta HA$. El momento de flujo a través del control del volumen es $\rho A(V_0 + \Delta V)^2 - \rho AV_0^2$, lo cual se reduce a $2\rho AV_0\Delta V$ cuando se ignora el término ΔV^2 (9).

En un tiempo Δt , la onda de presión viaja a una velocidad absoluta de $a - V_0$ y se mueve a una distancia $(a - V_0)\Delta t$. El impulso dentro de la longitud del ducto se reduce debido a la disminución en la velocidad. El flujo de masa afectado es $\rho A(a - V_0)\Delta t$ y el tiempo de velocidad de cambio del momento dentro del control de volumen es producto de ΔV y el flujo de masa cuya velocidad cambia en Δt segundos $\rho A(a - V_0)\Delta t\Delta V/\Delta t$ (9).

Substituyendo estos términos en la ecuación de momento queda como sigue:

$$\begin{aligned} -\gamma\Delta HA &= 2\rho AV_0\Delta V + \rho A(a - V_0)\Delta V \\ \Delta H &= -\frac{a\Delta V}{g}\left(1 + \frac{V_0}{a}\right) \end{aligned} \quad 3$$

El término V_0/a puede ser eliminado en la ecuación (3), por lo que el transitorio en el recipiente, debido al cambio en el incremento en la velocidad, es:

$$\Delta H = -\frac{a\Delta V}{g}, \quad \text{para } a \gg V \quad 4$$

Esta ecuación es fácil de usar en múltiples incrementos debido a los cambios de la velocidad, siempre que la primera onda no haya sido reflejada de nuevo hacia el punto de origen. Así la ecuación (4) queda expresada de la siguiente manera:

$$\sum \Delta H = -\frac{\sum a \Delta V}{g}, \text{ para } a \gg V \quad 5$$

Una de las limitaciones de las ecuaciones 4 y 5 es que son fáciles de usar sólo hasta que la onda de presión es reflejada y regresa a lugar donde ΔV fue generado. Para explicar la propagación y reflexión de la onda de presión, se debe de considerar la secuencia de eventos causados por una válvula que se cierra. Para ello se supone que el ducto es de diámetro constante y está construido con el mismo material, así como que la velocidad de onda es constante y la fricción es despreciable(9).

La Fig. 8 muestra el perfil del estado estacionario (HGD, *Hydraulic Grade Line*) para ductos. Supóngase que el fluido tiene una velocidad inicial V_0 en $t = 0$. Si la válvula se cierra al instante $t = 0$, el incremento ΔH se calcula usando la ecuación (4) con $\Delta V = -V$. El líquido aguas arriba de la válvula inmediatamente se detiene y la presión se incrementa. La onda de presión viaja aguas arriba a la velocidad del sonido a . Detrás de ella se produce el incremento en el perfil del estado estacionario dado por ΔH y la velocidad del líquido es cero. Delante de la onda, los valores de la velocidad y presión son los que tenía en el estado estacionario. La cantidad de masa que viaja hacia el recipiente es igual al incremento del volumen del ducto debido a la expansión del mismo, más la masa almacenada debido al incremento en la densidad del líquido(9), la Fig. 8, inciso b, muestra la condición al tiempo $t = 0.75 L/a$.

Cuando $t = L/a$, la onda llega al recipiente. La presión al interior del ducto es de $HR + \Delta H$ y la velocidad es en todas partes cero. El ducto se expande y el fluido se comprime. A la entrada del recipiente al ducto la presión es todavía HR . El sistema no está en equilibrio y el líquido y el ducto actúan como un resorte comprimido, causando que el flujo en el ducto regrese a una velocidad $-V_0$. En una primera aproximación, la velocidad revertida se puede considerar igual a la velocidad inicial debido a que la fricción fue despreciada (9).

Se considera ahora una onda de presión de magnitud $-\Delta H$ que viaja hacia la válvula a una velocidad a . Esto causa que la presión en el ducto detrás de la onda caiga a una altura HR a una velocidad $-V_0$. El diámetro del ducto y la densidad del fluido regresan a los valores originales. El frente de la onda de presión permanecen constante como $HR + \Delta H$ y la velocidad es cero (9), la Fig. 8, inciso c, muestra la condición al tiempo $t = 1.5 L/a$.

Cuando la onda llega a la válvula al instante $t = 2L/a$, la velocidad en cualquier instante es $-V_0$, el gradiente del estacionario es HR y el diámetro del ducto y la densidad del líquido tienen sus valores originales. La masa que se descarga dentro del contenedor entre $t = L/a$ y $2L/a$ corresponde a la cantidad de masa que entra durante los primeros L/a segundos y es almacenada debido a la compresión del fluido y la expansión del ducto (9).

Al tiempo $t = 2L/a$, el líquido que se encuentra en las proximidades de la válvula trata de aumentar su velocidad hacia el recipiente a una velocidad de $-V_0$. Desde que la válvula es cerrada e ignorando la posibilidad de que la columna de fluido se rompa debido a la vaporización. La velocidad del líquido en la válvula cerrada debe de ser cero en todos los tiempos. Para prevenir que el fluido se acelere, la válvula ejerce una fuerza de tensión que causa que el gradiente caiga a $-\Delta H$. Esta onda negativa viaja hacia el recipiente a la velocidad del sonido. Detrás de la onda de presión la presión es de $HR - \Delta H$, el diámetro del ducto se reduce y la densidad decrece. Delante de la onda el transitorio de presión continúa moviéndose a $-V_0$ dentro de recipiente como se muestra en la Fig. 8.

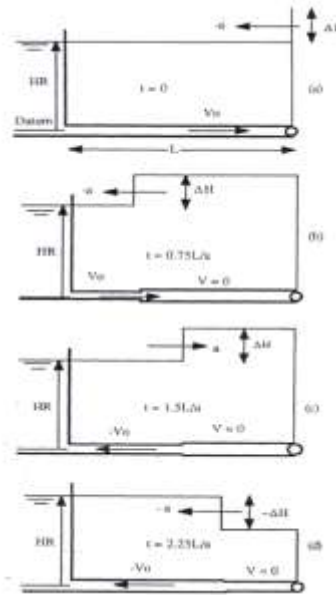


Fig. 8.- Propagación de la presión de onda(9).

El ciclo natural del fenómeno se muestra mejor cuando se gráfica H contra t para una sección en el ducto, y para un punto justo aguas arriba de la válvula. Para casos reales con fricción, la forma cuadrada de la onda se torna en una forma sinusoidal atenuada en el tiempo. La atenuación es causada por la pérdida de energía debido a la fricción del fluido, la expansión del ducto y a la compresión del fluido ver Fig. 9.

El incremento de los transitorios es directamente proporcional a la velocidad de la onda y la velocidad de la onda es un parámetro que se puede evaluar para cada sistema. Esta magnitud depende de la densidad y del módulo de Bulk del líquido, así como de las propiedades del ducto como su elasticidad, diámetro y espesor.

La velocidad con la que la onda de presión puede moverse entre dos puntos arbitrarios en el ducto depende de cuánto líquido puede estar almacenado en pequeñas secciones. La onda viaja entre dos puntos, en el tiempo que le toma moverse al exceso de líquido a una velocidad V_0 hasta detenerse. Si el ducto es muy elástico el líquido sufrirá una mayor compresión. Esto tomará más líquido y consecuentemente más tiempo para dilatar el ducto, y también se comprimirá el líquido e incrementará la presión en el ducto.

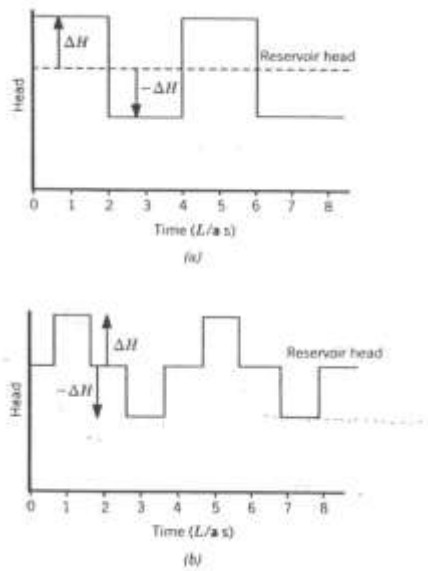


Fig. 9.- Incremento de presión al tiempo de cierre de la válvula (9).

Ahora bien, la ecuación de la velocidad de onda es obtenida a partir de 1) Aplicar la ecuación de continuidad, 2) Utilizando la ecuación (4) para relacionar ΔV y ΔH , 3) Relacionar el módulo de Bulk de los líquidos y 4) Relacionar la expansión del ducto con sus propiedades de esfuerzo-deformación (9) (18).

Considérese un ducto, en el tiempo $t = L/a$ después del instante en que la válvula se cerró. La velocidad del líquido en el ducto es cero y el diámetro del ducto ha sido expandido y el fluido es comprimido. La masa total del líquido es $\rho AV_0 L/a$. La cantidad acumulada debido a la elongación del ducto es pequeña y puede ser ignorada. La cantidad acumulada de líquido debido al incremento en el ducto es $\rho L \Delta A$ y la masa acumulada por el incremento de la densidad es $L A \Delta \rho$. Substituyendo esto en la ecuación de conservación de masa se obtiene:

$$\frac{\rho AV_0 L}{a} = \rho L \Delta A + L A \Delta \rho$$

6

Dividiendo por ρAL y reemplazando V_0 con $g \Delta H$, de la ecuación (4) se tiene

$$\frac{g\Delta H}{a^2} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad 7$$

Resolviendo para a^2

$$a^2 = \frac{g\Delta H}{\frac{\Delta A}{A} + \Delta\rho/\rho} \quad 8$$

Recordando que el modulo de Bulk se define como $K = \frac{\Delta P}{\Delta\rho/\rho}$ y $\Delta P = \rho g\Delta H$, y multiplicando por $K/\Delta\rho$ en ambos lados del cociente de la ecuación 8, se obtiene:

$$a^2 = \frac{K/\rho}{1 + K\Delta A/A\Delta P} \quad 9$$

Es necesario relacionar $\Delta A/A\Delta P$ a las propiedad de esfuerzo-deformación del ducto, teniendo en cuenta que la deformación (e) está relacionada con el esfuerzo (σ) mediante la relación $e = \sigma/E$, siendo con E el modulo de Young. El esfuerzo de tensión está relacionado con el diámetro (D), el espesor (t) y la presión interna del ducto. la Fig. 10 muestra una sección del ducto con espesor de pared (t) y su relación con el incremento de presión ΔP . El incremento en la fuerza de tensión circunferencial (T), el esfuerzo y el incremento en la presión están relacionados por las condiciones de equilibrio estático, es decir $\sum F_x = 0$.

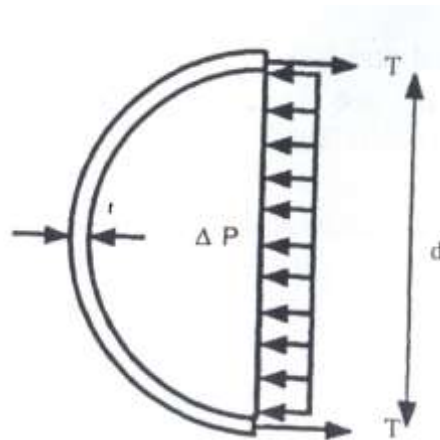


Fig. 10.- Diagrama de cuerpo libre para una sección del ducto.

$$2T - d\Delta P = 0 \text{ y } T = t * \sigma$$

Así $\sigma = \frac{D\Delta P}{2t}$. Entonces $e = \frac{D\Delta P}{2tE}$. Si ΔA es igual a las veces en que incrementa el radio de la circunferencia del ducto, entonces $\Delta A = \frac{A\Delta P D}{tE}$. Sustituyendo esto último en (9) se tiene que

$$a = \left(\frac{K/\rho}{1 + KD/tE} \right)^{1/2} \quad 10$$

2.3.2 Método de Caracterización

El sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías utiliza el método de caracterización para resolver de forma numérica el transitorio que se genera al incrementarse la presión al interior del ducto. El método de caracterización es utilizado para solucionar las ecuaciones diferenciales parciales, usadas para describir la inestabilidad del fluido y predecir el flujo en un ducto en cualquier parte y cualquier tiempo (9).

El sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías usa la teoría de elasticidad donde la compresibilidad del fluido y la elasticidad del ducto son incluidas. Las propiedades de propagación y reflexión de la onda de presión son utilizadas para calcular el intervalo de tiempo en el que ocurre el transitorio.

La inestabilidad del fluido está regida por la ecuación de movimiento, la cual considera la suma de todas las fuerzas que actúan sobre una masa de fluido en una dirección dada. La ecuación de movimiento aplicada en la dirección del movimiento del fluido x queda como sigue

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} + \frac{V\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad 11$$

La ley de conservación de la masa se aplica a un volumen de control. Esta ley exige que el flujo de masa a través de la superficie de control deba ser igual a la velocidad de cambio dentro de un volumen de control. Cuando se aplica esto a la situación de transitorios, es conocido que el volumen de control se puede incrementar por el aumento en un área de sección transversal y longitud debido al incremento de la presión (9). Esto genera que la ecuación de continuidad está dada por:

$$-\frac{\partial(\rho AV)}{\partial x} dx = \frac{\partial(\rho A dx)}{\partial T} \quad 12$$

Desarrollando la ecuación (12) y dividiendo entre $\rho A dx$ se tiene que:

$$-\frac{1}{A} \frac{dA}{dT} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad 13$$

Por otro lado si se tiene en cuenta que $dA = \frac{AD}{tE} dP = \frac{gADdH}{tE}$ y que el módulo de Bulk se puede expresar como $K = \frac{dP}{d\rho/\rho} = \rho g \frac{dH}{K}$, entonces, substituyendo en la ecuación (13) se tiene que

$$\frac{dH}{dT} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad 14$$

Esta es la forma final de la ecuación de continuidad y la de movimiento (ecuación 11). Las ecuaciones de momento y continuidad son desarrolladas, es decir, desarrollado la ecuación (15) se obtiene la ecuación siguiente

$$V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial T} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad 15$$

La cual se soluciona mediante el método de caracterización, desprendiéndose dos ecuaciones llamadas de compatibilidad, las cuales a continuación se muestran

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dT} + \frac{dV}{dT} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad C^+ \quad 16$$

para $\frac{dx}{dt} = +a$

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dT} - \frac{dV}{dT} - \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad C^- \quad 17$$

para $\frac{dx}{dt} = -a$

La solución de estas ecuaciones es la siguiente:

$$C^+: HP_I = CP - BQP_I \quad 18$$

$$C^-: HP_I = CM + BQP_I \quad 19$$

$$\text{Con } CP = H_{I-1} + BQ_{I-1} - RQ_{I-1}|Q_{I-1}|; \quad B = \frac{a}{gA}$$

$$\text{y } CP = H_{I+1} + BQ_{I+1} + -RQ_{I+1}|Q_{I+1}|; \quad R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2}$$

Si se suman las ecuaciones se tiene que

$$HP_I = \frac{CP + CM}{2} \quad 20$$

Estas son las ecuaciones que utiliza el sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías con el fin de simular el transitorio de presión que se presenta al interior del ducto debido al paro de una bomba o cierre de una válvula (9).

2.4 Confiabilidad estructural

El análisis de confiabilidad estructural ha sido de gran ayuda en varias ramas industriales, desarrollando y adaptándose para su aplicación en una amplia gama de ellas, como son la industria aeronáutica, la industria nuclear, la industria química, la de construcción y la industria petrolera, entre otras (7). Es importante apreciar que el análisis de la confiabilidad tiene como objetivo final la estimación de la probabilidad de que un sistema o componentes fallen en un periodo de tiempo dado.

Ya que los ductos de transporte con defectos de corrosión gradualmente decrecen su resistencia remanente hasta que la falla ocurre, se ha estado usando la confiabilidad enfocada a evaluar la integridad de ductos con corrosión. Esto ha traído un gran beneficio debido que pueden conjugarse y utiliza la evidencia del daño en el ducto que se obtiene con la inspección en línea del mismo. Por otra parte es importante considerar que la velocidad de corrosión, la geometría del ducto y las presiones de operación presentan incertidumbres que pueden ser modeladas estadísticamente en un periodo de tiempo dado (4). La confiabilidad estructural resulta la herramienta perfecta para considerar dichas incertidumbres en los procedimientos modernos de análisis de integridad mecánica de ductos de transporte.

Del objetivo del análisis de confiabilidad se desprende la definición de la confiabilidad como:

$$\text{Confiabilidad} = 1 - P_f$$

Donde P_f es la probabilidad de falla del sistema en un intervalo de tiempo predefinido (19) (7).

En otras palabras, la confiabilidad es la probabilidad de que el sistema no falle en un período de tiempo predeterminado.

La probabilidad de falla de cada uno de los defectos de corrosión en un ducto es calculada usando un modelo de confiabilidad estándar. Este método se basa en el análisis de las variables de carga (L) y resistencia (R) (4) (6) (7). El análisis de carga-resistencia tiene como fundamento el hecho de que las fallas son el resultado de que la carga aplicada excede la resistencia ($L > R$). Las variables de carga y las de resistencia no son valores fijas, sus valores tienen una incertidumbre que es resultado del proceso de medición de las dimensiones de los defectos y de la naturaleza del resto de las variables como el diámetro y espesor de la pared del ducto, y su valor de UTS. Muy especialmente, es importante considerar que la presión de operación tiene fluctuaciones tanto alrededor de su presión estacionaria, como los transitorios de presión dados por la operación incorrecta del ducto.

Debido a estas incertidumbres, la carga y la resistencia son caracterizadas a través de distribuciones estadísticas como se muestra en la figura Fig. 11. Al considerar un defecto de corrosión la falla ocurrirá si la variable de resistencia asociada al defecto es excedida por la variable de carga aplicada la sección de tubería donde se encuentra el defecto. Así la probabilidad de falla es por tanto estimada como la probabilidad de que la variable de carga exceda a la variable de resistencia, y generalmente se representa como el área de traslape de las curvas mostradas en la Fig. 11.

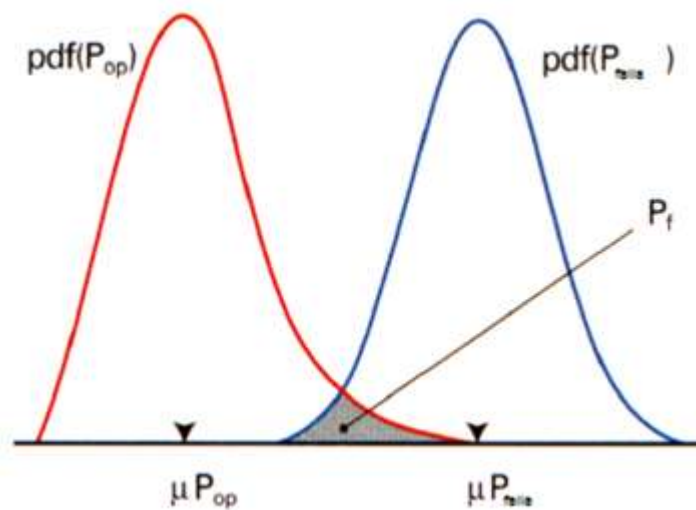


Fig. 11.- Criterio para estimar la probabilidad de falla (6) (7)(20)

Como ya se mencionó, la probabilidad de falla convencionalmente se representa como el área en la cual las funciones de distribución de carga y resistencia se traslapan es decir si $Z = Resistencia (R) - Carga (L)$, la falla ocurre cuando $Z \leq 0$. Lo anterior se obtiene a partir de desarrollar la siguiente expresión:

$$P_f = \int_{Z \leq 0} f_X(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{c \geq r} f_R(r) f_C(c) dr dc \quad 21$$

Recordando que la función de distribución acumulativa de una variable está dada por:

$$F_X(x) = P[X \leq x] = \int_{-\infty}^x f_X(y) dy \quad 22$$

La ecuación (21) se puede escribir como una sola integral:

$$P_f = P[R - C \leq 0] = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(y) f_S(y) dy \quad 23$$

O de forma alternativa como:

$$P_f = P[R - C \leq 0] = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(y) \{1 - F_S(y)\} dy \quad 24$$

Actualmente se usan modelos para calcular la resistencia del ducto de transporte ingresando parámetros como la geometría del defecto, las propiedades del ducto, y la velocidad de crecimiento de los defectos (21). Para los defectos de corrosión presentes en el ducto, la presión de falla, como variable de resistencia, es calculada como función de la profundidad, longitud del defecto, el límite elástico y la velocidad de crecimiento de los defectos de corrosión, tomando como base modelos de los mecanismos de fractura (22). Como se mencionó anteriormente todos estos parámetros son caracterizados por funciones de distribución de probabilidad, y son usados en modelos de resistencia

deterministas para calcular la función de distribución de probabilidades para la resistencia.

El enfoque que se utiliza en este trabajo para calcular la probabilidad de falla para los defectos de corrosión se muestra en la Fig. 12. En esta figura se observa cómo es evaluado el modelo de resistencia dividido en dos grupos. Primero, el de los daños característicos que contienen todos los parámetros de los defectos en el ducto. Segundo, el de los parámetros de resistencia del ducto que contiene la información que afecta a la resistencia en el tiempo, incluyendo las propiedades del ducto.

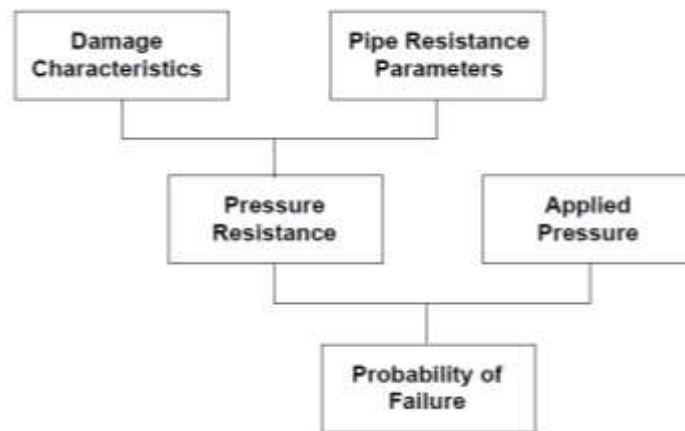


Fig. 12.- Diagrama para evaluar la probabilidad de falla (7).

La idea básica del análisis de integridad y mantenimiento de ductos para las causas de falla dependientes del tiempo es: localizar y eliminar significativamente la existencia de los defectos antes que éstos alcancen un tamaño crítico. En esencia, esto es un proceso para modificar la distribución de probabilidad del tamaño de los defectos, basándose en la capacidad y precisión de la de los métodos de inspección o rehabilitación del ducto.

2.4.1 Métodos de evaluación de defectos de corrosión

Dentro de los diferentes métodos para evaluar la resistencia remanente de tramos de tuberías con defectos de corrosión en un ducto de transporte son, los más exactos y precisos son los métodos orientados al colapso plástico (22).

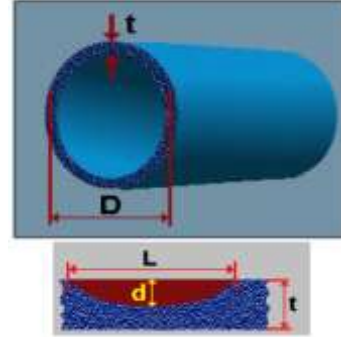
Los modelos de colapso plástico (independiente de la tenacidad) pueden sintetizarse como:

$$P_F(\sigma_f, D, t, L, d) = P_0(\sigma_f, D, t)R_s\left(\frac{d}{t}, L/\sqrt{Dt}\right) \quad (23)$$

Donde P_F es la presión de falla. P_0 Es la presión de falla en un ducto sin defectos y está en función del “esfuerzo de flujo” (σ_f)

D El diámetro externo.

t El espesor de pared.



R_s Es el factor de resistencia remanente y en función de las dimensiones del defecto, con $R_s \in [0,1]$

L La longitud del defecto.

d La profundidad del defecto.

La falla en los defectos de la pared de un ducto que está sujeta a las presiones internas tiene dos límites.

1. Defecto con una longitud y profundidad que tiende a cero (es decir ducto sin defectos).
2. Defectos infinitamente largos, de profundidad finita.

Se asume que el material del ducto es tenaz y la falla ocurre debido al colapso plástico. En el primer caso, el esfuerzo de falla tiende hacia el esfuerzo de falla de un ducto libre de defectos, basado en el espesor de pared (t). Para el segundo caso el esfuerzo de falla tiende hacia el esfuerzo de falla de un ducto sin defecto, pero basado sobre la reducción del espesor de pared ($t-d$).

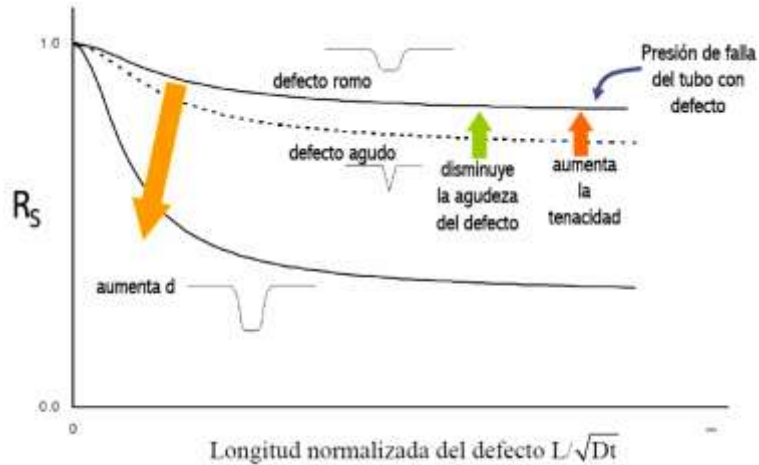


Fig. 13.- Efecto de la resistencia del material y de la profundidad, longitud y agudeza del defecto(22) (23)

El esfuerzo de falla de un ducto libre de defectos tiende hacia el esfuerzo último a la tensión (UTS). Sin embargo, al tener en cuenta el efecto de los defectos con geometría de gran tamaño, teóricamente, el esfuerzo de falla depende de las características del endurecimiento por deformación del material y se asume un criterio de cedencia (Tresca o Von Mises) (22). Experimentalmente, resulta que el esfuerzo de falla está entre los límites de Tresca y Von Mises y esto es razonablemente aproximado por el esfuerzo último a la tensión(22).

El esfuerzo de falla de un ducto libre de defectos puede ser interpretado como un esfuerzo de flujo. El esfuerzo de flujo describe el papel del material y simplifica la modelación del endurecimiento por deformación desde la cedencia hasta la inestabilidad plástica.



Fig. 14.- Esfuerzo-Deformación –tenacidad (23)

El factor de Folias M_T permite considerar la concentración local de esfuerzos debida al abultamiento de la pared de un recipiente con presión interna en las zonas donde ocurre un adelgazamiento importante. En algunos modelos el factor de folias es usado para evaluar la presión de falla, como un factor de construcción, derivado del ajuste para geometrías no lineales.

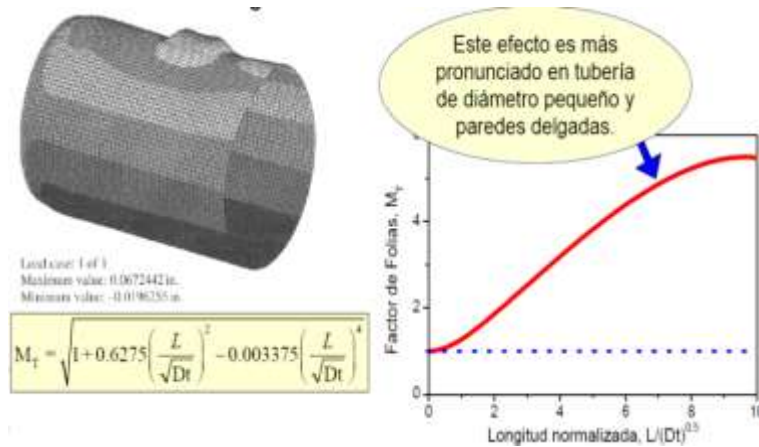


Fig. 15.- Factor de Folias (23)

Algunos modelos han sido utilizados para estimar el esfuerzo remanente en ductos con defectos de corrosión, como lo es el ASME-B31G (22) y el modelo de C-FER (22) que siguieron la forma de un modelo semi-empírico. Sin embargo, algunos parámetros fueron redefinidos. Recientes trabajos sobre la predicción del esfuerzo de falla de ductos corroídos revelan que los métodos antes mencionados fueron muy conservadores. Al dar una visión sobre esto, Advantica (Fu 1999) y Battelle (Stephens 2000) propusieron

involucrar modelos de predicción en los cuales se revisara la definición del esfuerzo de flujo basándose en el esfuerzo último a la tensión en lugar del esfuerzo de cedencia y modificar el factor de construcción por el factor de folias (23).

En base a lo anterior la selección del método más apropiado para la evaluación de defectos de corrosión debe estar basada en los siguientes elementos:

- Propiedades mecánicas de la tubería.
- Comportamiento esperado durante la falla.
- Geometría de los defectos.
- Condiciones de carga.
- Incertidumbre de los parámetros. (14) (23)

Los modelos básicos calculan la resistencia de un ducto con defectos de corrosión usando la ecuación que a continuación se muestra:

$$r = \frac{2t}{D} \sigma_F \left(\frac{1 - d/t}{1 - d/M_T t} \right) \quad 25$$

Con r como la resistencia de presión o simplemente. Presión de falla.

Ahora bien la falla que generan los defectos de corrosión, se asume como resultado de la profundidad del defecto de corrosión en combinación con la presión interna del ducto. Los criterios que se usan para establecer la condición de la falla se desarrollaron usando los modelos básicos y la ecuación 25. De esta manera los criterios de fallas pueden considerarse criterios de ruptura o criterios de fuga según sea el caso.

Criterio de Fuga si $P_{FR} < \frac{\sigma_F 2t}{M_T D}$ (23)

Y el criterio de Ruptura si $P_{FR} \geq \frac{\sigma_F 2t}{M_T D}$ (23)

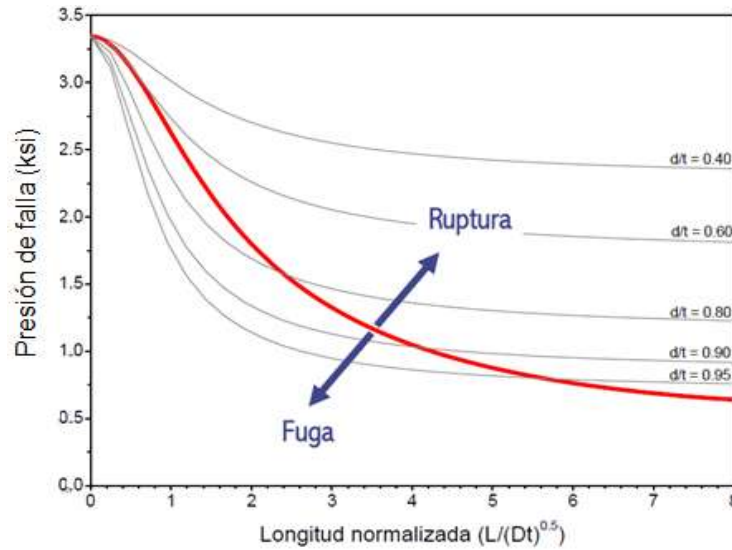


Fig. 16.- Criterios de fallas usando el criterio de falla B31G modificado (14) (23)

Si el esfuerzo de flujo y el Factor de Folias se calculan según se presenta en el modelo B31G modificado, los criterios de falla se observan gráficamente en la Fig. 16.

Tomando en cuenta que varios métodos han sido desarrollados para predecir la presión de falla para ductos de transporte con defectos de corrosión, un número de estos métodos son presentados en la Tabla 2. Todos estos métodos establecen la longitud y extensión del área corroída y la presión interna como variable principal. Los métodos son empíricos o semi-empíricos. El orden en el que se presentan los métodos es basándose en el criterio que origina la falla, los cuales están basados en las ecuaciones de falla NG-18, mientras que los métodos más recientes se han desarrollado de estudios numéricos validados(11) (14) (23).

Prog.	Modelos de Evaluación de Defectos de Corrosión
1	ASME B31G
2	B 31G Modificado
3	RSTRENG-2
4	LPC-2
5	PCORRC

Tabla 2.- Algunos Modelos de Evaluación de Defectos.

Es necesario comentar brevemente los modelos y las ecuaciones más importantes que son necesarias para evaluar la presión de falla.

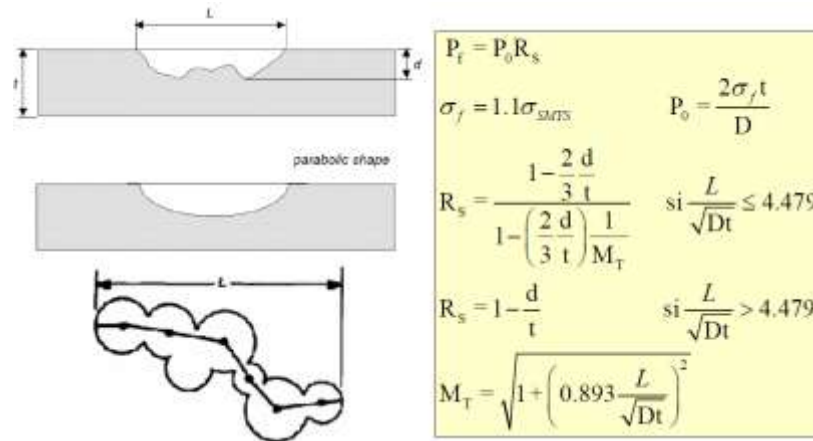


Fig. 17.- ASME B31G modelo y ecuaciones (23).

- Método ASME B31G para la evaluación de defectos: Usa el esfuerzo de flujo σ_F definida como $\sigma_F = 1.1 \sigma_{SMYS}$. El ducto falla cuando el esfuerzo debido a la presión interna supera el esfuerzo de flujo. La forma del defecto se aproxima a una parábola definida por la longitud axial L y profundidad máxima d del defecto y el factor de folias se simplifica en dos términos (14) (23).
- Modelo ASME B31G Modificado (RESTRENG-1). Este modelo usa el esfuerzo de flujo definida como $\sigma_F = \sigma_{SMYS} + 10 \text{ ksi}$ y el ducto falla cuando el esfuerzo debido a la presión supera a σ_F . La forma del defecto se aproxima como intermedia entre fondo plano y parabólica. El área del defecto se aproxima como $A = 0.85dL$ (14) (23).

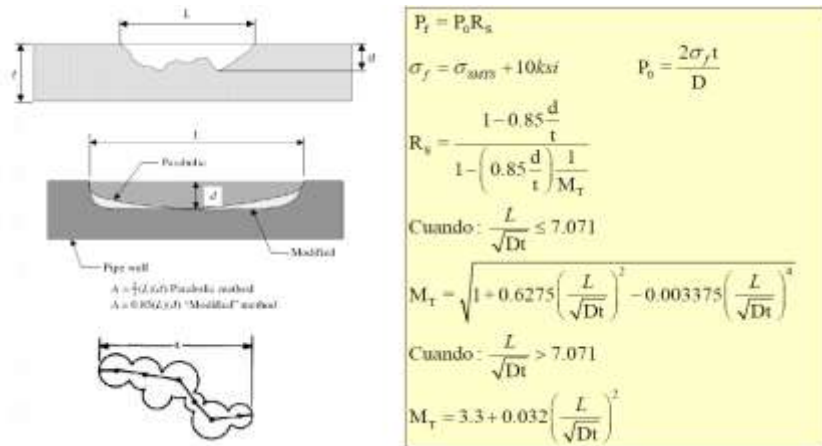


Fig. 18.-ASME B31G MODIFICADO modelo y ecuaciones (14) (23).

Modelo RSTRENG-2. Usa el método RSTRENG-1 en secciones de la proyección del perfil del defecto en el plano axial de la tubería. La proyección se divide en secciones y se determina la presión de falla de cada una de ellas. La presión de falla del defecto correspondiente a la mínima de las presiones determinadas. Es posible considerar la interacción entre defectos y predecir presión de falla del defecto combinado con dimensión equivalente. Este método mantiene los antecedentes del modelo RSTRENG-1 con respecto al tipo de material y condiciones de fallas.

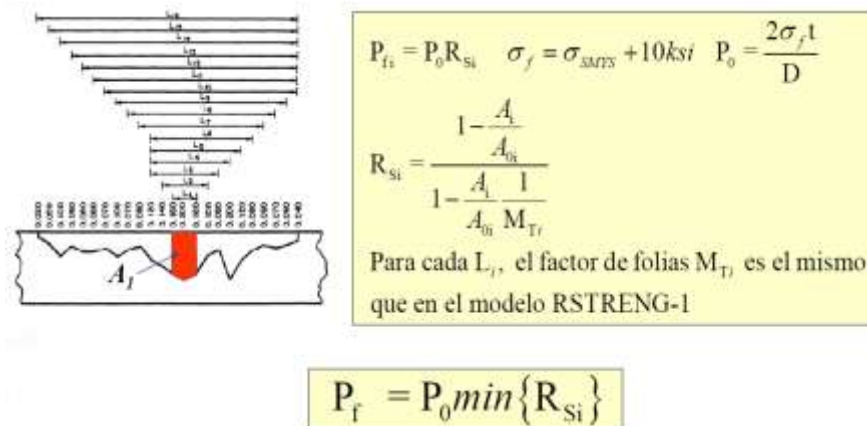
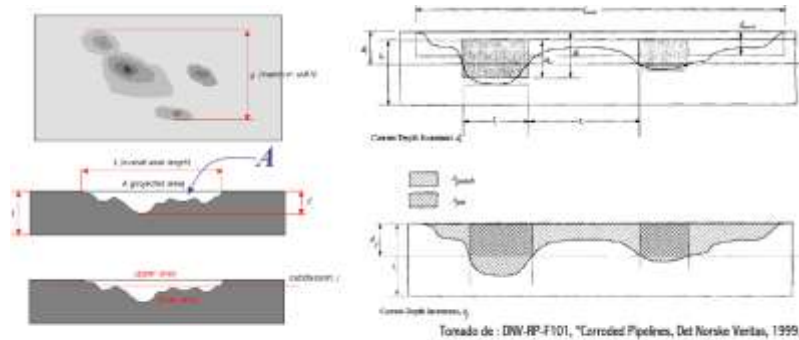


Fig. 19.- RSTRENG-2 modelo y ecuaciones (14) (23).

- Método LPC-2: Se basa en la ecuación de falla LPC-1 y se aplica al perfil de la corrosión proyectada que resulta de seccionar la pared del tubo a diferentes profundidades. La presión de falla es la mínima entre todas las estimadas en este

proceso iterativo. Es un método del tipo espesor efectivo; está específicamente orientado a caracterizar la presión de falla dominada por colapso plástico. Permite considerar la interacción entre defectos y predecir la presión de falla debido a la interacción.



$$P_f = \min \{ P_{fTM}, P_{fTP}, P_{f1}, \dots, P_{fk} \}$$

Fig. 20.- LPC-2 modelo y ecuaciones (14) (23).

- Modelo PCORRC: Utiliza los límites que se sitúan entre la presión de falla del ducto sin defectos (superior P_{fs}) y la presión de falla para un defecto de longitud infinita (inferior P_{fi}) (14) (23).

$$P_{fs} = UTS \frac{2t}{D} \quad P_{fi} = UTS \frac{2t}{D} \left\{ 1 - \frac{d}{t} \right\}$$

La forma del defecto entre esos límites se aproxima como elíptica, definida por la longitud axial L del defecto y su profundidad máxima d. Con aplicación específica al colapso plástico. Recomendado cuando la tenacidad superior a 45 lbp (61J) y para temperaturas superiores a la Temperatura de Transición Dúctil-Frágil (TTDF) (14) (23).

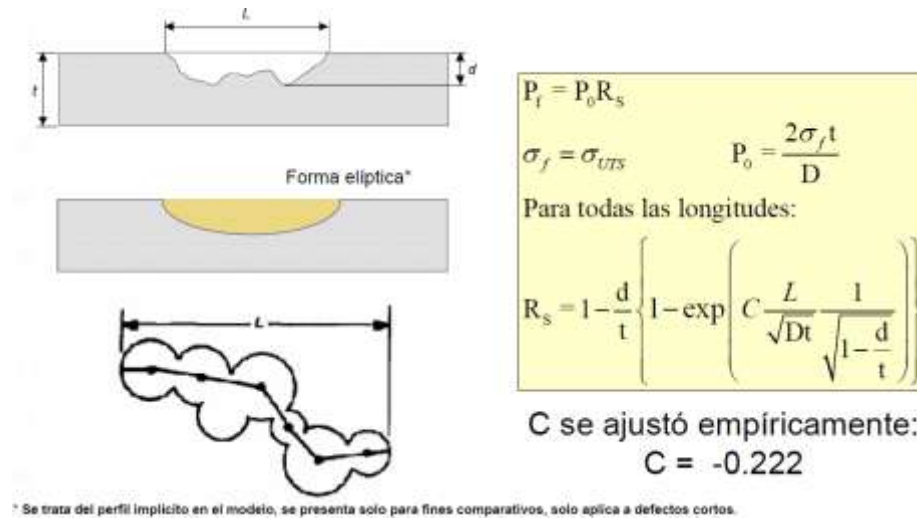


Fig. 21.- PCORRC modelo y ecuaciones (14) (23).

Este modelo se utiliza en este trabajo dado que produce resultados más exactos y precisos que los modelos B31G y RSTRENG-1 para todas las longitudes del defecto debido a la forma de las superficies de falla. Para diferentes evaluaciones, presenta una mejor dispersión en los resultados de las estimaciones al estar orientado al colapso plástico. Su aplicación requiere conocer con certeza las propiedades del material, por lo que es utilizado de manera más propia para materiales con $Y/T \rightarrow 1.0$, con grado X70 y X80. Como limitante se puede mencionar que su aplicación no es muy extensa.

Los resultados de la evaluación de la presión de falla de defectos de corrosión tienen mayor dependencia de las variaciones en la profundidad que en las variaciones de la longitud del defecto. La dependencia de la evaluación implica medir la geometría del defecto y lograr la mayor exactitud en la determinación de la profundidad.

La comparación entre los modelos es inevitable y arrojan ciertas peculiaridades. El modelo B31G, muestra resultados inconsistentes para defectos largos y para defectos cortos y profundos arroja presiones de falla muy grandes. El factor de folias para el RSTRENG-1 con tres términos, tiene la ventaja de producir una función de falla continua y de mayor exactitud que el modelo B31G. El modelo PCORRC tiene asociado los menores errores

como modelo, tanto en exactitud como en precisión y es muy útil cuando se conoce que la tenacidad del material es elevada. En la Fig. 22 se presentan algunos ejemplos de los modelos.

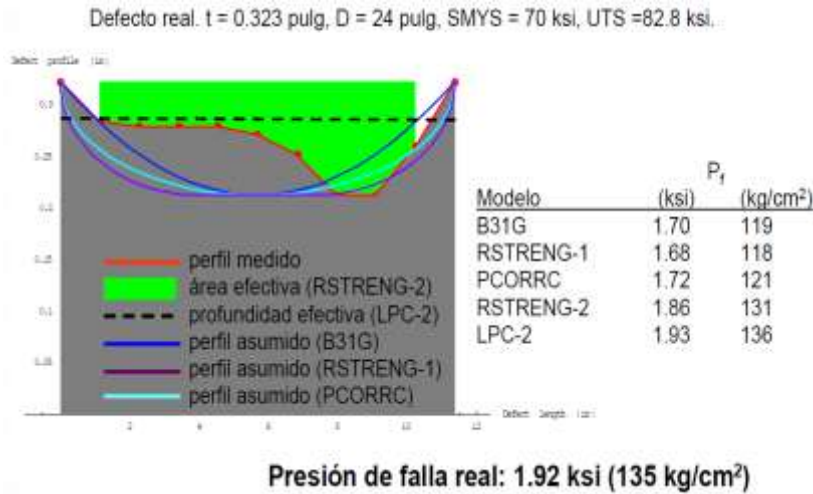


Fig. 22.- Comparativo de los modelos de falla (14) (23).

¿Cómo y cuándo usar alguno de los métodos?, es una pregunta que los expertos y específicamente PEMEX en la norma NRF-030-PEMEX-2009 da respuesta y que se detalla en la Fig. 23.

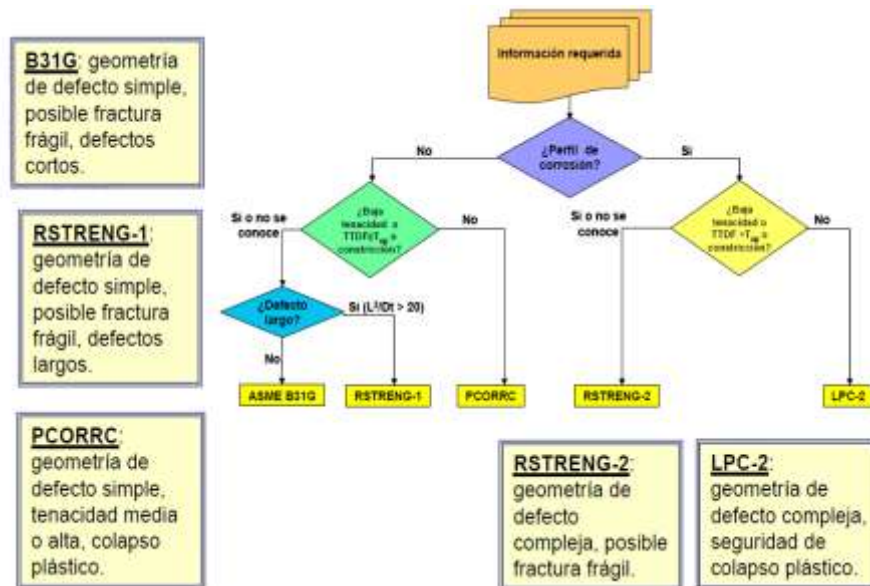


Fig. 23.-Diagrama del esfuerzo remanente en Ductos con defectos de corrosión (14) (23).

2.4.2 Índice de falla

En este trabajo la confiabilidad se expresa a través del índice de falla, expresado en unidades de incidentes por kilometro y por año (incidentes/km-año) (4) (11) (12). De esta manera, el índice de falla describe la rapidez con la cual ocurren las fallas en un ducto o sistema de ductos en un intervalo de tiempo dado.

El índice de falla depende de la confiabilidad $R_t(t)$ en un intervalo de tiempo $[t, t + \Delta t]$ (12).

$$P(t < T \leq t + \Delta t) = F_T(t + \Delta t) - F_T(t) = R_T(t) - R_T(t + \Delta t) \quad 26$$

Así, el índice de falla en función del tiempo se puede escribir como

$$\lambda = \frac{R_T - R_T(t + \Delta t)}{\Delta t R_T} \quad 27$$

Cuando $\Delta t \rightarrow 0$, dicha probabilidad se conoce como índice de falla $\lambda(t)$ y se determina a través de:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t} = -\frac{dR(t)}{dt} \frac{1}{R(t)} \quad 28$$

De aquí se desprende que:

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right) \quad 29$$

Y

$$P_f(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right) \quad 30$$

Donde $R(t)$ es la confiabilidad en función del tiempo, $P_f(t)$ la probabilidad de falla y $\lambda(t)$ el índice de falla (12). Las ecuaciones anteriores constituyen la base teórica para comprender la relación que existe entre el índice de falla y la probabilidad de falla.

Con la finalidad de describir las fallas que existen en un sistema de ductos, existen métodos que describen las fallas usando procesos estocásticos definidos a través del tipo de distribución de los tiempos de ocurrencia de las fallas, asumiendo que son una variable aleatoria. El proceso conocido como Poisson Homogéneo (PPH), tiene su uso natural en el análisis de mecanismos de fallas independientes del tiempo. Por otra parte, el proceso de Poisson no Homogéneo (PPNH) encuentra aplicación en el análisis de fallas producidas por mecanismos de degradación como la corrosión.

En el caso más general cuando los tiempos entre fallas sucesivas no se distribuyen idéntica e independientemente, se está en presencia de un proceso de Poisson no homogéneo. En este caso, la probabilidad de que ocurran k fallas en el sistema en el intervalo $(0, t]$ se determina utilizando la expresión (31).

$$P(N(t) = k) = \frac{(\int_0^t \lambda(\tau) d\tau)^k - \exp(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau)}{k!} \quad 31$$

El número esperado de fallas será:

$$E(N(t)) = \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \quad 32$$

Ahora bien si k es igual a cero en la ecuación (31), quedan la expresión (29) y (30) y así la probabilidad de falla queda en función del índice de falla. Utilizando la función de potencias, se tiene que

$$\lambda(t) = \beta v t^{v-1} \text{ con } \beta, v \geq 0 \quad 33$$

$$N(t) = \beta t^v$$

Cuando los tiempos entre fallas sucesivas están idénticamente e independiente distribuidos siguiendo una distribución exponencial con media λ se está en presencia de un proceso de Poisson homogéneo, donde

$$P(N(t) = k) = \frac{(\lambda t)^k \exp(-\lambda t)}{k!} \quad 34$$

$$E(N(t)) = \lambda t$$

La confiabilidad en $(0, t]$ se puede calcular haciendo $k = 0$ de esta forma las ecuaciones 29 y 30 quedan como

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad 35$$

$$P_f(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$$

Cuando se hace un análisis de la confiabilidad de un sistema de ductos se debe de considerar que se debe de hacer un análisis a través del estudio del comportamiento de n subsistemas reparables y que se comportan de manera similar y su índice de fallas es el mismo (PPH) o sigue la misma ley de potencia (PPNH) (12).

A partir de la expresión (35) se puede determinar el índice de falla para el tiempo t para una unidad de tiempo $\delta t = 1$ año y para una longitud del ducto (en kilómetros). Para ello, se utiliza la probabilidad de falla anual de la sección en t ($P_{fa}(t)$) resultando:

$$\hat{\lambda}(t) = -\frac{\text{Log}(1 - P_{fa}(t))}{L * \delta t} \left[\frac{\text{inidentes}}{\text{km} - \text{año}} \right] \quad 36$$

La probabilidad de falla anual de la sección (PF_S^A), se estima a partir de la probabilidad de falla de la sección (PF_S) para un tiempo t y $t - 1$ (en años) y $t > 0$ con la siguiente expresión:

$$PF_S^A(t) = \frac{PF_S(t) - PF_S(t - 1)}{1 - PF_S(t - 1)} \quad 37$$

Donde $(t - 1) = 0$; implica el año de la inspección del ducto.

Y la probabilidad de falla de la sección está dada por: $PF_S = 1 - \prod(1 - PF_i(t))$. Suponiendo que la probabilidad de falla de cada defecto ($PF_i(t)$) es independiente, y cada probabilidad de falla para cada defecto es estimada por la simulación Monte Carlo.

Capítulo 3- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para establecer una metodología que permita estimar la confiabilidad de ductos en condiciones de operación cotidianas y extremas producidas por transitorios de presión en la tubería de transporte se establece el desarrollo experimental que a continuación se describe. Este desarrollo toma como base un sistema de cómputo para la simulación de fluido y los resultados de la inspección en línea en las secciones del ducto con defectos de corrosión. Esta información es obtenida de las bases de datos de inspecciones con equipo instrumentado de los ductos de transporte en PEMEX Región Sur.

El desarrollo experimental inicia recopilando la descripción técnica del ducto, la cual incluye información como diámetro, espesor de pared, longitud total, presión de operación, especificación del acero, propiedades mecánicas del acero, tiempo de servicio, cantidad de componentes estructurales del ducto (bombas, válvulas, bridas, dispositivos de seguridad o alivio), temperatura de operación y el trazo perfil del ducto. Es de suma importancia conocer el tipo y cantidad de hidrocarburo que transporta el ducto que se analiza, ya que por el tipo de hidrocarburo se conocerán las propiedades físicas del fluido, particularmente su densidad, viscosidad, presión de vapor y el modulo de Bulk. De la cantidad de hidrocarburo que transporte el ducto se conocerá la velocidad del flujo al interior del mismo.

La información que se pueda adquirir acerca de la manipulación de los componentes del ducto como son las bombas y válvulas, así como la frecuencia en la que ocurren éstas, son igual de importantes para establecer la metodología. A partir de ésta información y con la ayuda de un sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías fue posible visualizar las presiones que se generaron al interior del ducto, tanto estacionarias como transitorias producto de la simulación de la operación cotidiana y errónea de los componentes del ducto.

Por otro lado, fue preciso recopilar la información referente a los defectos de corrosión que detectó el equipo instrumentado durante la inspección en línea, siendo de gran interés el tipo, longitud y profundidad de cada defecto, así como la distancia en la que se ubica con respecto al origen del ducto.

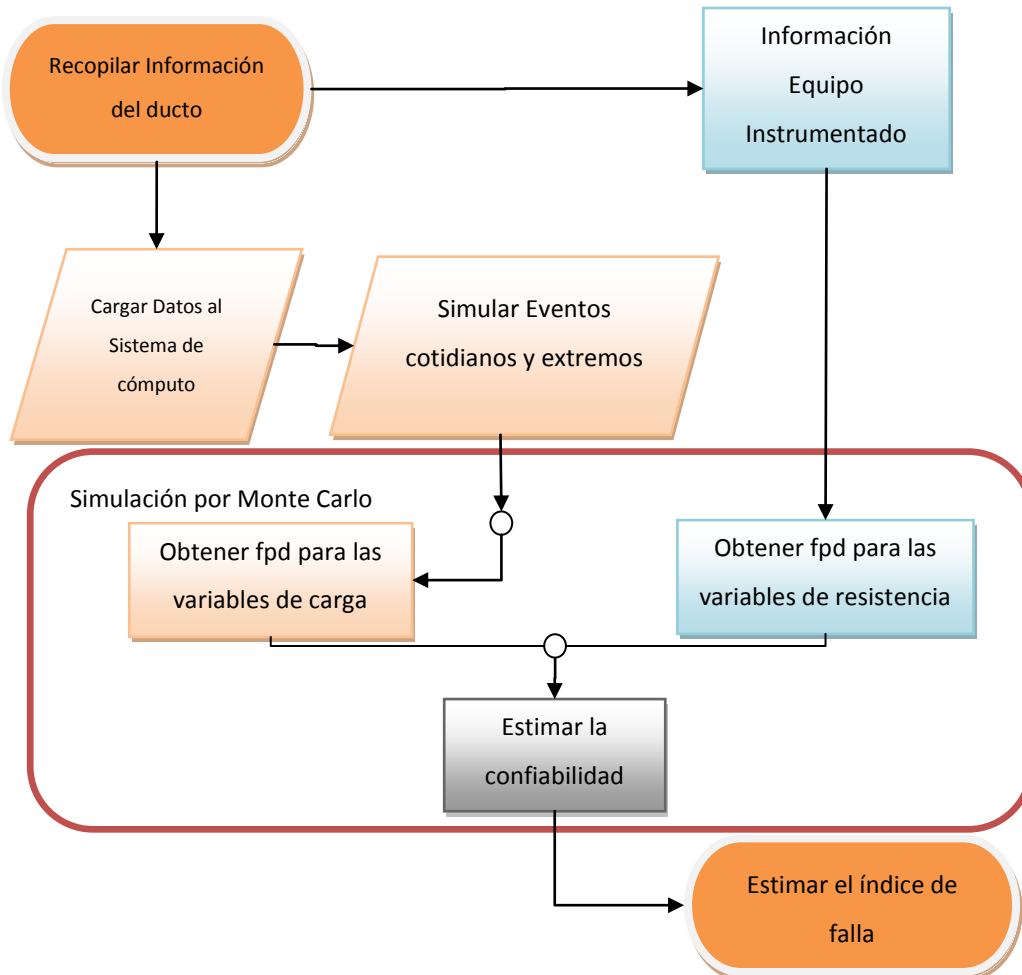


Fig. 24.- Diagrama de Flujo que muestra el desarrollo experimental.

Mediante el modelo PCORRC se calcularon las presiones de falla de cada sección del ducto con defectos de corrosión y utilizando el método de simulación de Monte Carlo se estimó la probabilidad de falla de estas secciones. Es preciso mencionar brevemente que este método usa la simulación de variables aleatorias para generar una pseudopoblación que permita generar muestras (pseudomuestras). La investigación que se puede hacer a partir

de la pseudopoblación o pseudomuestras, permite entender de mejor manera el desarrollo estadístico derivado de datos reales (24). Después se calculó el índice de falla de todo el ducto en función de la evolución de la probabilidad de anual falla de cada defecto en el tiempo, lo que permitió observar cómo el índice de falla anual evoluciona en el tiempo.

3.1 Descripción Técnica del ducto y propiedades del Fluido.

Para corroborar la metodología propuesta, tomando como base el diagrama de la Fig. 24, se recopiló la información de un Oleoducto de 36 pulgadas (914 mm) de Diámetro Nominal (D.N), con longitud aproximada de 109.6 kilómetros. El ducto fue construido y puesto en operación en 1980 para el transporte de Crudo Istmo y está bajo la responsabilidad del Sector Cárdenas, perteneciente a la Gerencia de Transporte y Distribución de Hidrocarburos de la Región Sur de Pemex Exploración y Producción (PEP). La inspección con equipo instrumentado estuvo a cargo de la empresa BRITISH GAS con fecha de 03 de abril de 2000. La Tabla 3 muestra de forma resumida la descripción técnica del ducto.

Especificación Técnica del ducto	API-5L-X60
Esfuerzo último a la tensión (UTS)	75 ksi (517 MPa)
Diámetro Nominal	36 pulgadas (914 mm)
Espesor Nominal	0.469 pulgadas (11.9 mm)
Longitud del ducto	109.6 km
Inicio de Operación	1980
Producto que transporta	Istmo
Flujo	378.77 MBD (Miles de Barriles Diarios)
Presión de Operación	31.97 kg/cm ² (0.45 ksi, 3.1 MPa)
Temperatura	35° C

Tabla 3.- Especificaciones técnicas del ducto analizado (25).

El crudo que transporta este ducto es un crudo llamado Istmo, el cual tiene las siguientes propiedades

Densidad	850 kg/m ³
Viscosidad	9 centipoise
Presión de Vapor	6psi
Modulo de Bulk	1470 MPa.
Temperatura	36 °C

Tabla 4.- Propiedades del crudo Istmo (25).

Las válvulas que forman parte del ducto son del tipo globo las cuales tienen un control manual o automático y el cierre es totalmente de forma rectangular, y perpendicular a la dirección del flujo. La posición para que la válvula opere hidráulicamente es modificando la cantidad de liquido que se encuentra en una cámara por encima del diafragma. Para este ducto en particular el coeficiente de flujo de las válvulas (C_v) es de 4500. PEMEX ha medido en campo los tiempos de cierres de las válvulas cuando se hacen de forma manual. Para ductos de 36 pulgadas se tienen registro que van de los 1,080 segundos a 10,800 segundos. De forma automática estos tiempos van de los 180 segundos a los 1,800 segundos (25).

Las características de las Bombas para este ducto se tomaron a partir de la cantidad de flujo que transporta y la presión a la que opera según reporte de PEMEX Región Sur (25).

3.2 Sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías

Con la ayuda de un sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías en un ducto, se simularon eventos como: el cierre de válvulas y el apagado de bomba. Estos eventos que se pueden presentar en condiciones de operación cotidiana o de manera extrema cuando se realizan incorrectamente. La simulación de los eventos permitió observar los transitorios de presiones que se generaron al interior del ducto. El sistema de

cómputo para la simulación de fluidos en tuberías que se usó es llamado AFT Impulse ver 3.0 (26). Con AFT Impulse se pueden modelar golpes de ariete o transitorios de presión para una amplia gama de sistemas de líneas, lo que permite entender de mejor manera el desarrollo dinámico en un sistema de ductos (26). Este sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías permite encontrar la solución de los estados estacionarios de los sistemas de ductos, dando solución a un sistema con condiciones iniciales, los cuales son reiniciados cuando se modelan transitorios. Los resultados se presentan, mediante gráficas y ventanas de resultados que proporciona el sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías.

Es necesario mencionar que AFT Impulse contempla un amplio margen de características para modelar sistemas de ductos (26):

- Transitorios en apertura y clausura de sistemas.
- Sistemas con ramificaciones o curvas.
- Sistemas transitorios con válvulas.
- Sistemas de bombas con transitorios.
- Sistemas con presión o válvulas con transitorios que controlen el flujo.
- Sistemas con cavitación transitoria.
- Sistemas con dispositivos de supresión tal como acumuladores, tanques, interruptores de válvulas de vacío.
- Sistemas con densidad y viscosidad variable.
- Desarrollo de fluidos no newtonianos.

Como se mencionó antes, AFT Impulse emplea un método de caracterización (MOC) para simular la transición de un fluido en un ducto(26).

El simulador realiza ciertas suposiciones que a continuación se describen, las cuales, junto con la teoría de golpe de ariete que ya antes fue descrita, permiten determinar las

características de los transitorios de presión en el ducto que resultan de la manipulación incorrecta del mismo.

- El flujo es de un líquido o un gas
- El flujo se simula en una dimensión
- No hay reacciones químicas
- La velocidad de propagación es constante durante el transitorio
- Las burbujas que se forman durante el transitorio no se consideran.

AFT Impulse genera cinco ventanas que trabajan de manera integrada, de tal forma que se puede trabajar en varias de las cinco ventanas simultáneamente, como se muestra en la siguiente figura.

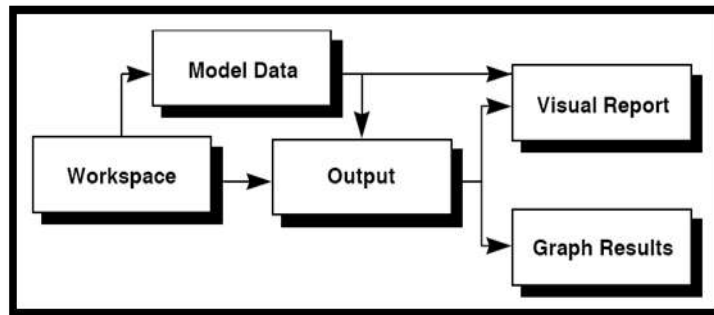


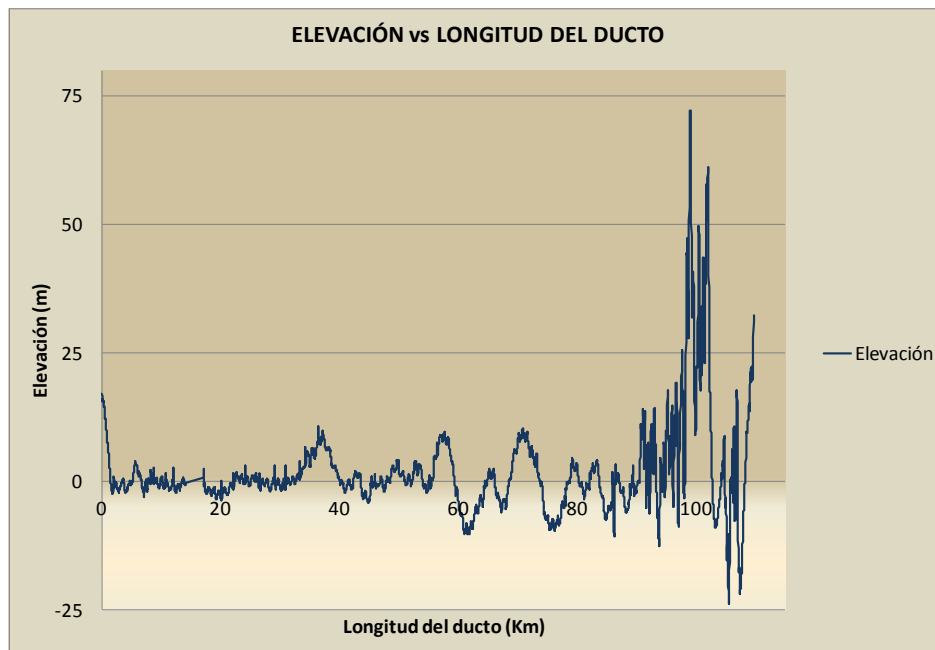
Fig. 25.- Ventanas que representan el flujo de trabajo de AFT Impulse ver 3.0

De las cinco ventanas de trabajo dos son de entrada, dos son de salida y una muestra la información de entrada y de salida. Las cinco ventanas trabajan en una interrelación estrecha, procesando, analizando y documentando simultáneamente el análisis de flujo del sistema.

3.2.1 Modelo del ducto.

Con los datos que se recabaron y que se presentaron en la sección 3.1, en conjunto con los datos que ofreció la inspección con equipo instrumentado, se modeló el ducto de interés en AFT impulse.

Como primer paso se consideraron todos los elementos estructurales del ducto, los cuales en este caso fueron: una bomba, tres válvulas y dos contenedores. Además se tuvieron en cuenta los resultados de la inspección con equipo instrumentado del ducto. En estos resultados hay una sección que se refiere al geo-posicionamiento del ducto, la cual muestra las coordenadas (x, y, z) en el espacio; es decir la latitud, longitud y altura con respecto al nivel del mar. Esta última coordenada es la que se usó para construir el trazo perfil del ducto. La Gráfica 1 muestra el Trazo Perfil del ducto.



Gráfica 1.- Trazo Perfil del Oleoducto de 36" D.N. analizado

Como se puede observar, en el Trazo Perfil del ducto presenta una gran variedad de alturas. Por esta razón fue necesario discretizar el perfil de tal forma que se generara la menor variación relativa adyacente posible para entonces usar AFT Impulse e ingresar el perfil de la línea. Esto, redujo considerablemente los tiempos de simulación.

Cada uno de los componentes estructurales de este ducto se definió dentro de AFT Impulse como una unión (J) y el sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías le asigna un número progresivo en orden de aparición. Cada unión se conectó

mediante una línea (P) la cual representa el ducto, el simulador de fluidos en tuberías le asigna un número progresivo.

Las uniones y las líneas se definieron a partir de los datos recabados y a continuación se resumen:

Los recipientes que se encuentran al inicio y final del modelo, se consideraron como cerrados y que contienen el fluido a simular, por lo que en este caso solo se definió la elevación a la que se encontraban. De esta forma la definición de los recipientes quedó como sigue

Unión	Elevación (m)
Contenedor 1(J1)	15.5
Contenedor 2 (J6)	32.3

Con las consideraciones de arriba, la bomba se definió en la sección de “modelo de la Bomba” como sigue:

Unión	P (kg/cm ²)	H1 (m)	Q (MBD)	H2 (m)	Elevación (m)	Modelo de Curva
Bomba (J2)	31.97	16.9	378.77	32.3	16.9	Pump Curve

Las válvulas se consideraron con el mismo Coeficiente de Flujo, de esta forma quedaron definidas como se muestra a continuación:

Unión	Elevación(m)	Cv
Válvula 1(J3)	10.8	4500
Válvula 2(J4)	3.3	4500
Válvula 3(J5)	32.4	4500

Las líneas se definieron en tramos y se tomaron en cuenta aspectos como, la especificación del acero, el espesor y diámetro del ducto, así como la longitud de los tramos.

Es necesario comentar que al ser un gran número de elevaciones para cada una de las líneas, se sugiere que éstas se definan dentro de AFT Impulse utilizando las opciones: - sección “usar elevaciones intermedias” - pestaña “opciones”, las cuales se encuentra en las especificaciones de cada tramo.

Línea	Longitud (km)	Diámetro (Pulg.)	Espesor (Pulg.)	Especificación	Elevaciones(m)											
Línea 1 (P1)	0.025	36	0.469	X-60	Anexo I Tabla I											
Línea 2 (P2)	36.46	36	0.469	X-60	Anexo I Tabla I											
Línea 3 (P3)	49.96	36	0.469	X-60 </tr <tr> <td>Línea 4 (P4)</td> <td>23.12</td> <td>36</td> <td>0.469</td> <td>X-60</td> <td>Anexo I Tabla I</td> </tr> <tr> <td>Línea 5 (P5)</td> <td>0.036</td> <td>36</td> <td>0.469</td> <td>X-60</td> <td>Anexo I Tabla I</td> </tr>	Línea 4 (P4)	23.12	36	0.469	X-60	Anexo I Tabla I	Línea 5 (P5)	0.036	36	0.469	X-60	Anexo I Tabla I
Línea 4 (P4)	23.12	36	0.469	X-60	Anexo I Tabla I											
Línea 5 (P5)	0.036	36	0.469	X-60	Anexo I Tabla I											

Por último, se definieron las propiedades del fluido dentro de la base de datos de AFT Impulse, tomando en cuenta las condiciones del fluido que transporta el ducto y que se registraron en la Tabla 4.

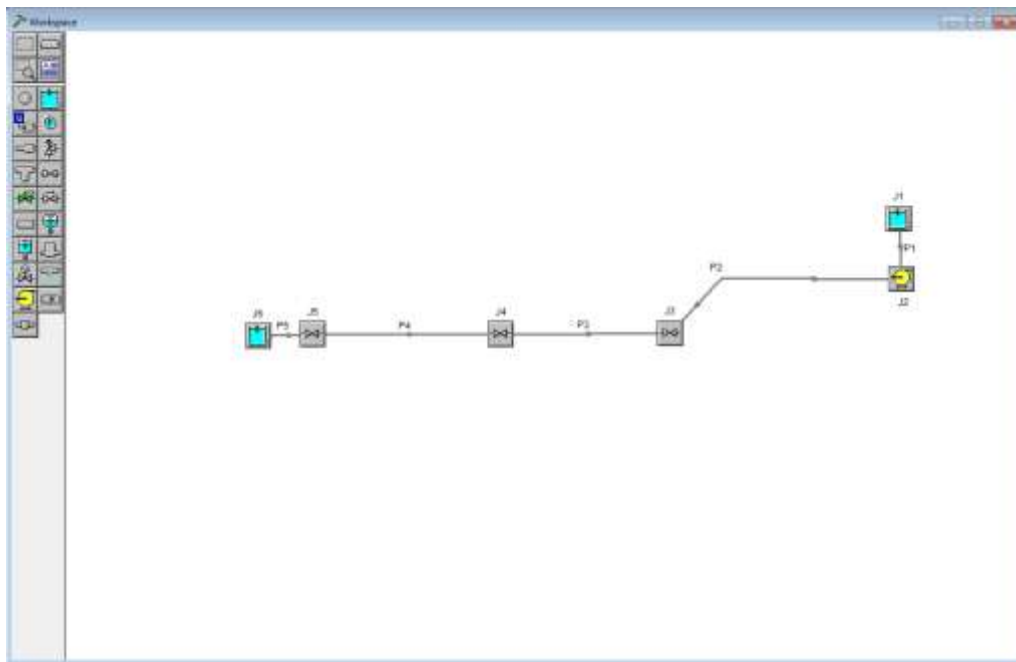


Fig. 26.- Diagrama en AFT Impulse del ducto de 36" D.N. y 109.6 km de longitud.

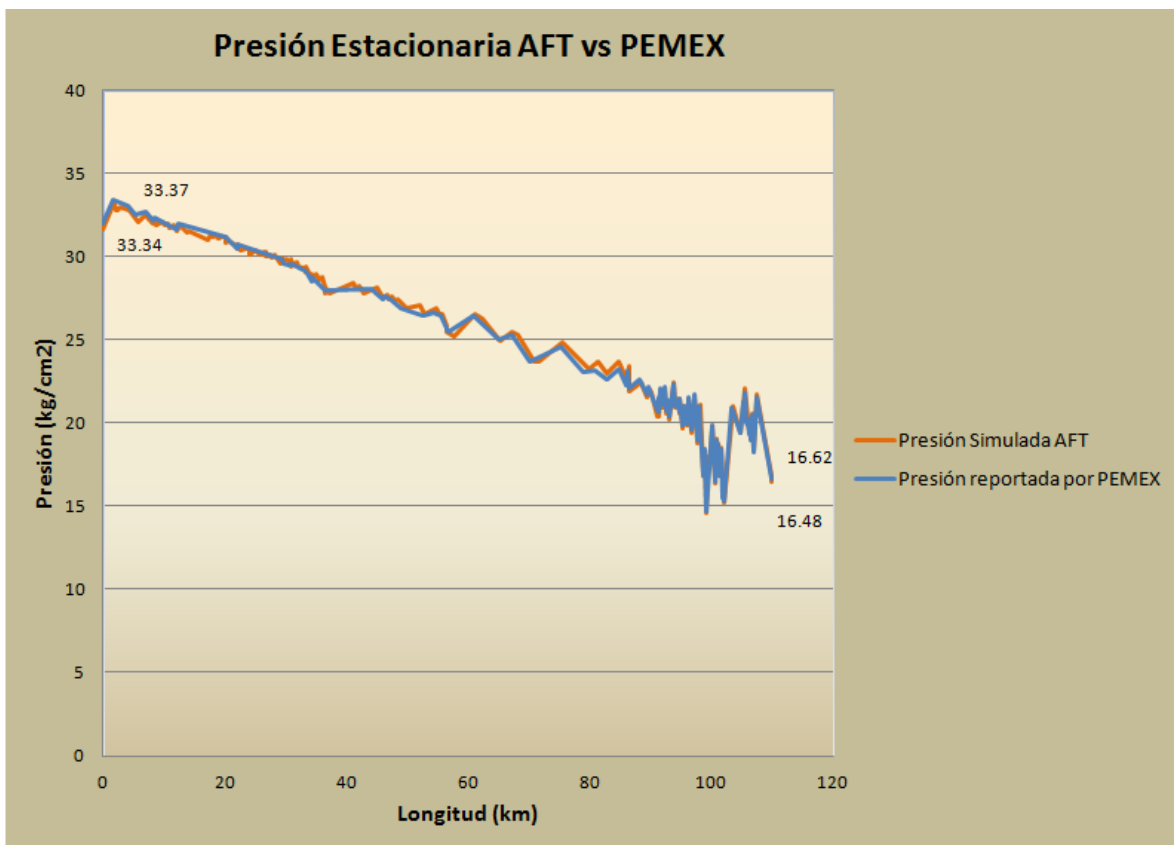
3.2.2 Presión Estacionaria

Una vez que el sistema del ducto, necesario para ejemplificar la metodología, quedó representado en el simulador de fluidos AFT Impulse usando el diagrama que se muestra en la Fig. 26, se requirió obtener la presión inicial del ducto con los componentes

estructurales definidos, Esto con el fin de corroborar que la simulación en el estado inicial fuera similar a la presión estacionaria real.

Cuando las presiones estacionarias de los ducto fueron comparadas, se pudo constatar que tan aceptable son los resultados de la simulación con respecto a las condiciones reales de operación. La Gráfica 2, muestra este comparativo y la relación que guarda la presión estacionaria con respecto al perfil de elevaciones.

La presión estacionaria es de suma importancia ya que es la única forma de saber si el sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías está realizando de forma adecuada la simulación, además de dar la pauta para comprender de mejor manera los transitorios que se presenten durante las simulaciones.



Gráfica 2.- Comparativo del perfil de presión estacionaria real y simulada en el ducto que se analiza.

3.2.3 Simulación de Eventos

Una vez que el perfil de la presión estacionaria fue determinado, se estableció el procedimiento para simular eventos las cuales están relacionadas de forma directa con los estados que antes se mencionaron (el apagado de bomba, cierre de válvula, etc.). Es por ello que se requiere de establecer tiempos y forma en las cuales se manipulan las válvulas.

De acuerdo con los tiempos de cierre que PEMEX ha medido en campo, se establecieron cuatro tiempos y tres formas diferentes de cierre. Los tiempos de cierre van del cierre rápido al cierre lento y son los siguientes:

Tiempos para cada Válvula	
No.	Tiempo (segundos)
t1	180
t2	270
t3	560
t4	4860

Modos de cierre para cada válvula	
Función	Modo de Cierre
f_i	Rápido – Lento
g_i	Lineal
h_i	Lento - Rápido

Con estas dos condiciones se construyeron doce funciones que describen los modos de cierre en función del tiempo.

Para el tiempo de cierre de 180 segundos se construyeron tres funciones y fueron las siguientes:

$$f_1(t): \begin{cases} -175t + 4500 & \text{con } t \in [0,20] \\ \frac{20,000}{t} & \text{con } t \in (20,90] \\ -2.46t + 444.44 & \text{con } t \in (90,180] \end{cases} \quad g_1(t): -25t + 4500 \quad \text{con } t \in [0,180]$$

$$h_1(t): \begin{cases} -2.46t + 4500 & \text{con } t \in [0,90] \\ 4500 - \frac{20,000}{180-t} & \text{con } t \in (90,160] \\ -175t + 31500 & \text{con } t \in (160,180] \end{cases} \quad 38$$

De igual manera se construyeron tres funciones para cada tiempo de cierre, 270 segundos, 560 segundos y 4860 segundos, mismas que se muestran en las ecuaciones (39), (40) y (41), respectivamente.

$$f_2(t): \begin{cases} -116t + 4500 & \text{con } t \in [0,30] \\ \frac{30,000}{t} & \text{con } t \in (30,135] \\ -1.65t + 444.44 & \text{con } t \in (135,270] \end{cases} \quad g_2(t): -16t + 4500 \quad \text{con } t \in [0,270]$$

$$h_2(t): \begin{cases} -1.65t + 4500 & \text{con } t \in [0,135] \\ 4500 - \frac{30,000}{270-t} & \text{con } t \in (135,240] \\ -116t + 44820 & \text{con } t \in (240,270] \end{cases} \quad 39$$

$$f_3(t): \begin{cases} -58t + 4500 & \text{con } t \in [0,60] \\ \frac{60,000}{t} & \text{con } t \in (60,280] \\ -0.76t + 428.5 & \text{con } t \in (280,560] \end{cases} \quad g_3(t): -8t + 4500 \quad \text{con } t \in [0,560]$$

$$h_3(t): \begin{cases} -0.765t + 4500 & \text{con } t \in [0,280] \\ 4500 - \frac{60,000}{560-t} & \text{con } t \in (280,500] \\ -58t + 32666 & \text{con } t \in (500,560] \end{cases} \quad 40$$

$$f_4(t): \begin{cases} -7t + 4500 & \text{con } t \in [0,500] \\ \frac{500000}{t} & \text{con } t \in (500,2430] \\ -0.0846t + 411.5 & \text{con } t \in (2430,4860] \end{cases} \quad g_4(t): -0.925t + 4500 \quad \text{con } t \in [0,4860]$$

$$h_4(t): \begin{cases} -0.0846t + 4500 & \text{con } t \in [0,2430] \\ 4500 - \frac{500,000}{4860-t} & \text{con } t \in (2430,4360] \\ -7t + 3400 & \text{con } t \in (4360,4860] \end{cases} \quad 41$$

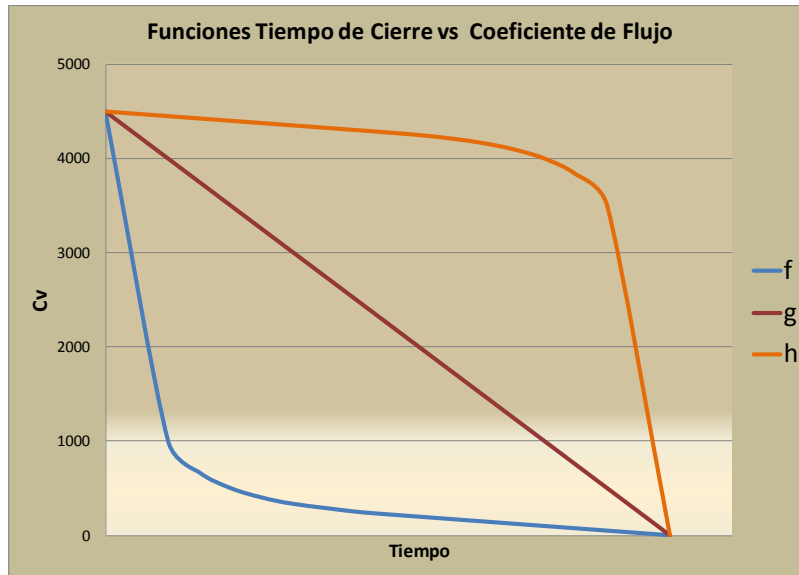


Fig. 27.- Funciones que muestran los modos de cierre de las válvulas.

Como se puede observar, las funciones arriba descritas en función del tiempo de cierre se relacionaron directamente con el coeficiente de flujo de las válvulas C_v . Una vez que se definieron las tres funciones que describían los modos de cierre para los cuatro tiempos, cada válvula generó doce posibles combinaciones y al considerarse el estado cuando la válvula estuviera abierta, fueron en total 13 los estados que se generaron por válvula. Al ser tres válvulas en el sistema, el total de estados fue de 39.

AFT Impulse requirió que se definiera el tiempo de cierre de las válvulas, para que pudiera realizar las simulaciones de los eventos. Las funciones (38), (39), (40) y (41) fueron definidas dentro de las especificaciones de la válvula, en la sección "datos del transitorio".

La simulación de los eventos no estaría completa si los estados, referente a la bomba no se hubieran definido. Es por esta razón que se establecieron dos estados para la bomba. El primero de los estados es cuando la bomba está trabajando y el segundo cuando pasa de estar trabajando a apagada. Ambos estados se definieron en AFT Impulse de tal forma que el primer estado se definió dejando la bomba en su estado inicial. El segundo estado se definió en el apartado que se refiere a las especificaciones de la bomba, en la sección "datos del transitorio". Se indicó al sistema de cómputo para la simulación de fluidos en

tuberías que la bomba pasaba de trabajando a apagada, cuando el porcentaje de la velocidad del flujo fuera cero en un determinado tiempo.

Una vez que se establecieron los eventos a simular, y para que AFT Impulse realice la simulación para cada evento, debe de configurarse “el control de paso” en la sección “Control de Transitorio” en el apartado que se refiere al control de solución del transitorio. La definición “del control de paso” ayudó a controlar el tiempo de la simulación. Es necesario decir que entre mayor sea “el tiempo de paso” se obtienen soluciones más adecuadas. Sin embargo, esto hace que se use mayor cantidad de recursos de cómputo y por ende el tiempo de simulación aumenta considerablemente. Para este trabajo se definió un “control de paso” de 300 segundos.

El total de simulaciones a efectuar se estimó a través de la regla de la multiplicación. La cual dice que si una operación se puede llevar a cabo de n_1 formas y si para cada una de estas se puede realizar una segunda operación en n_2 formas, entonces las dos operaciones se pueden ejecutar juntas de $n_1 n_2$ formas (8). De esta manera el total de estados que generó el sistema fueron los que se presentan en la Tabla 5:

Válvula 1		Válvula 2		Válvula 3	
t1	f_1	t1	f_1	t1	f_1
	g_1		g_1		g_1
	h_1		h_1		h_1
t2	f_2	t2	f_2	t2	f_2
	g_2		g_2		g_2
	h_2		h_2		h_2
t3	f_3	t3	f_3	t3	f_3
	g_3		g_3		g_3
	h_3		h_3		h_3
t4	f_4	t4	f_4	t4	f_4
	g_4		g_4		g_4
	h_4		h_4		h_4
Abierta		Abierta		Abierta	
Bomba Trabajando					
Bomba Trabajando- Apagado					

Tabla 5.- Estados para las válvulas y Bomba.

De la Tabla 5 y de la regla de la multiplicación se obtuvieron el total de estados para el sistema. El total de simulaciones que se realizaron fueron de 4,394 simulaciones.

Unión	Bomba	Válvula 1	Válvula 2	Válvula 3
Estados	2	13	13	13

Es necesario decir que inicialmente se consideró que cada una de las 4,394 simulaciones tiene la misma probabilidad de ocurrencia. En la etapa que sigue se asignó una probabilidad de ocurrencia a cada estado en función de cuan creíble resulta en términos operativos.

3.3 Funciones de distribución para las variables de carga.

Una vez que se realizaron las 4,394 simulaciones, de este mismo número de posibles escenarios de operación, se tomó en cuenta que las frecuencias con la que ocurren los eventos no necesariamente deben ser las mismas. Se buscó una frecuencia de ocurrencia para los eventos que estuviera basada en el historial del ducto, pero en este rubro PEMEX al momento no cuenta con información pública que pueda ser usada. Es por ello que se estableció una tabla de probabilidades de ocurrencia de cada estado, la cual se designó basándose en la experiencia que se tiene al trabajar con este tipo de ducto en función de cuán creíble resulta cada estado en términos operativos. De esta forma la Tabla 5 queda de la siguiente manera.

Válvula 1	Prob.	Válvula 2	Prob.	Válvula 3	Prob.			
t1	f_1	0.008	t1	f_1	0.014	t1	f_1	0.016
	g_1	0.003		g_1	0.004		g_1	0.005
	h_1	0.007		h_1	0.012		h_1	0.014
t2	f_2	0.015	t2	f_2	0.020	t2	f_2	0.025
	g_2	0.006		g_2	0.007		g_2	0.008
	h_2	0.013		h_2	0.016		h_2	0.020
t3	f_3	0.030	t3	f_3	0.032	t3	f_3	0.040
	g_3	0.005		g_3	0.007		g_3	0.010
	h_3	0.020		h_3	0.030		h_3	0.037
t4	f_4	0.070	t4	f_4	0.085	t4	f_4	0.080
	g_4	0.030		g_4	0.033		g_4	0.034
	h_4	0.060		h_4	0.070		h_4	0.075
Abierta	0.690	Abierta	0.650	Abierta	0.630			

Bomba Trabajando	0.95
Bomba Trabajando - Apagada	0.05

Tabla 6.- Tabla de probabilidad de los estados

Con la ayuda de la Tabla 6 y con el total de simulaciones realizadas se construyeron histogramas de frecuencia para los eventos que generaron transitorios de presión, y se realizó de la siguiente manera.

Primero, se hizo la suposición de que los eventos son independientes. Esto implica que la probabilidad de que un estado combinado o evento ocurra se determina como la multiplicación de la probabilidad de los estados que lo integran. Una vez que se conoció la probabilidad de cada uno de los eventos se precedió a su normalización.

Segundo, una vez que se identificó cuáles fueron las probabilidades normalizadas para cada uno de los 4,394 eventos, se definieron secciones con cuyo kilometraje estuviese en concordancia con el perfil operativo del ducto. Nótese que cada evento genera un perfil de presiones al interior y a lo largo de todo el ducto. En cada sección del ducto, se comparó el valor de la presión asociada a cada evento con el valor de la presión estacionaria asociada a la sección. Esto permitió descartar las presiones que estuvieran en la cercanía o por debajo de la presión estacionaria de tal forma que se enfocó a los estados y eventos que generaron transitorios de presión cuyo valor supera la presión estacionaria.

Tercero, una vez que se identificaron los eventos que generaron transitorios de presión, teniendo en cuenta que no todos los eventos crearon estos transitorios, la probabilidad asociada a cada evento se ajustó, debido a una nueva normalización sobre el espacio de estos eventos generadores de presión extremas.

Cuarto, la nueva probabilidad normalizada se multiplicó por 30,000. Este número tiene la función de no tomar en cuenta los eventos que tienen probabilidades del orden de 10^{-5} o menores. Además se consideró la parte entera del resultado de la multiplicación, con la cual se obtuvieron valores enteros de la frecuencia de cada uno de los eventos que generaron transitorios de presión.

Quinto, se determinó a través de un proceso de ajuste estadístico la función de distribución de probabilidad que mejor describe la distribución de las presiones para los eventos que generaron transitorios. Se estableció así la distribución estadística para la variable de carga en cada segmento de interés en el ducto que se analiza.

3.4 Información del equipo Instrumentado

Ya antes se mencionó como la corrosión está íntimamente relacionada con el tiempo de servicio del ducto y que la inspección con equipo instrumentado proporciona información sobre la condición física del mismo. La Tabla 7 muestra un resumen de la información sobre el dimensionamiento de las indicaciones que se detectaron en el ducto que se estudia durante la inspección del año 2000.

INDICIACIÓN	CANTIDAD	PROFUNDIDAD MAXIMA %(e.p.)	LONGITUD MAXIMA (mm)
Pérdida de Metal Externa (PM/EXT)	5896	78	2044
Pérdida de Metal Interna (PM/INT)	2060	70	1588
Objeto Metálico	151	No Aplica	No Aplica
Defectos de Fabricación Interna	41	20	91
Defectos de Fabricación Externa	8	21	20
Defectos de Soldadura	3	No Aplica	No Aplica

Tabla 7.- Resumen de las indicaciones detectadas por el equipo instrumentado en abril del año 2000

Con la recopilación de la información sobre la condición del ducto, se determinó qué indicaciones se utilizarían para acometer el análisis y cuál sería el modelo menos conservador para calcular la presión de falla. De esta manera se decidió que el análisis se haría sobre las indicaciones identificadas como pérdida de Metal Externa (corrosión externa en el ducto) y el modelo PCORRC como ecuación de falla para estimar la presión de falla del ducto. Esta decisión se basa en el hecho de que al día de hoy se cuenta con mayores estudios sobre la corrosión externa y los respectivos modelos de crecimiento de este tipo de defectos en ductos enterrados. Como ya se mencionó, la presión de falla fue utilizada para establecer la resistencia de cada sección del ducto con defectos de corrosión en los análisis de confiabilidad que se realizan en este trabajo.

3.5 Funciones de Distribución para las variables de resistencia

La elección del modelo PCORRC implicó identificar las variables necesarias para evaluar la presión de falla, las cuales fueron el espesor de pared y diámetro del ducto, el esfuerzo último a la tensión del material y la profundidad y longitud del defecto de corrosión. Se tomó en cuenta que cada una de estas variables tiene asociada una incertidumbre y una función de distribución de probabilidad, mismas que se mostraron en la Tabla 1, En base a estas distribuciones se puede hacer uso de la simulación de Monte Carlo para hallar una pseudopoblación de cada variable, es decir, con un programa de computadora que generó de manera aleatoria cada una las variables del modelo para establecer la presión de falla a través de la aplicación de la ecuación de falla de PCORRC.

Prog.	Generar Variables Aleatorias	Covarianza	Función de Distribución
1	Para el espesor	0.010	Normal
2	Para el diámetro	0.060	Normal
3	Para el UTS	0.035	Normal
4	Para la profundidad de la indicación	0.068	Normal
5	Para la velocidad de Corrosión	0.1	Weibull
6	Para la longitud de la indicación	0.2	Normal

Tabla 8.- Tipo distribución asociada a la incertidumbre de las variables

Nótese que la velocidad de corrosión no forma parte de las variables para calcular la presión de falla, pero si tiene una gran influencia en el crecimiento de la profundidad de la indicación. Esta es la razón por la cual debe de ser considerada. Téngase en cuenta que al igual que las variables anteriores ésta se debe generar de manera aleatoria mediante la simulación Monte Carlo. El modelo de velocidad de corrosión que se usa para el desarrollo de este trabajo es el resultado de un estudio para ductos enterrados que considera las tierras Arcillosas, Franco-Arcilloso y Areno-Franco-Arcilloso, tipos de suelo que son comunes en la región sur (1)

Se puede decir a manera de resumen que la simulación por Monte Carlo genera un número elevado de vectores, cada uno de ellos con una realización de las variables aleatorias utilizadas para estimar la presión de falla $X = (t, D, UTS, d_0, l_0)$ asociada a cada defecto de corrosión (6). Cada vector X se evalúa dentro del modelo PCORRC y, al considerar el conjunto de resultados de la aplicación de PCORRC a estos vectores, es posible conocer la distribución de la presión de falla o resistencia del tramo de tubería que contiene al defecto.

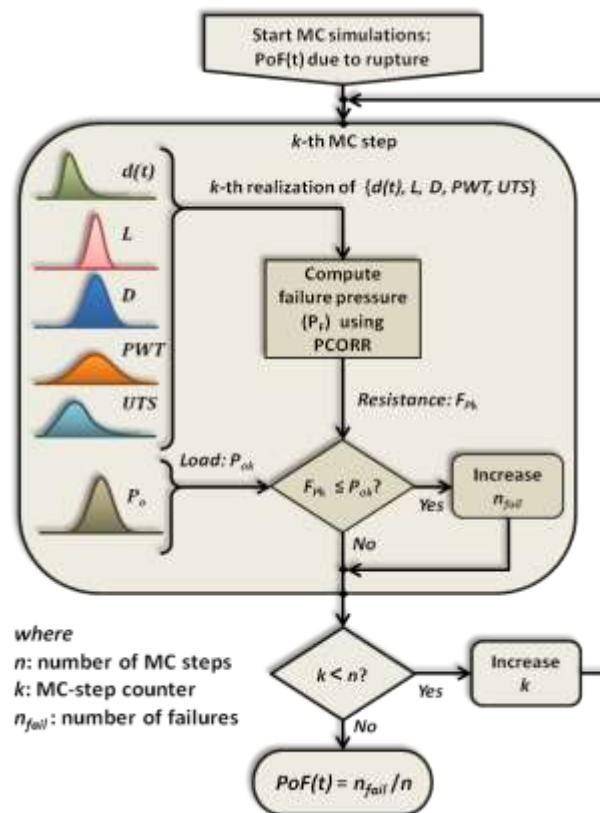


Fig. 28.- Diagrama de flujo para la simulación de Monte Carlo

3.6 Confiabilidad Estructural

Como ya se mencionó en el Capítulo 2.4 para evaluar la confiabilidad es necesario primero estimar la probabilidad de falla de cada defecto de corrosión, en otras palabras, es necesario identificar en qué proporción las variables de carga superan a las variables de resistencia. Posteriormente es posible estimar el índice de falla del ducto a partir de la estimación de la probabilidad anual de falla del mismo, la cual se estima a partir de la combinación de las probabilidades de falla de los defectos individuales.

Hasta este momento se conoce las variables necesarias para estimar la presión de falla y las distribuciones de los transitorios de presión. Al saber cuáles eran las variables necesarias para estimar la probabilidad de falla se establecieron los pasos a seguir para estimar la probabilidad de falla de cada defecto haciendo uso del diagrama de la Fig. 28.

1. Se establecieron 23 secciones del ducto para el estudio.
2. Se realizaron 30,000 simulaciones Monte Carlo por defecto
3. Para las indicaciones ubicadas dentro de las 23 secciones, se contempló que las variables necesarias para estimar la presión de falla tuvieran una distribución estadística, debido a la incertidumbre asociada a cada variable.
4. Se tomó en cuenta la velocidad de corrosión para ductos enterrados, por tal razón se usó el modelo que encontró el Dr. Julio Cesar Altamirano en su tesis de maestría en el Instituto Politécnico Nacional, titulada "Modelación Estadística del Crecimiento de Picaduras".
5. Usando las distribuciones de cada variable, Se construyó un vector aleatorio de las mismas, eligiendo de forma aleatoria un elemento para cada distribución por cada simulación. Se obtuvo así el vector de variables $X = (d(\text{tiempo}), L, D, t, UTS)$
6. Con el vector X y usando el modelo PCORRC, se estimó la presión de falla asociada al tramo de tubería que contiene al defecto.

7. Cada sección del ducto se le asoció una distribución estadística de presiones transitorias y se eligió de forma aleatoria un elemento en cada paso.
8. Se comparó el transitorio de presión y la presión de falla, seleccionados en cada simulación
9. Dentro del ciclo, se estableció un contador para cuando el transitorio de presión fuera mayor que la presión de falla.
10. La probabilidad de falla asociada al defecto se estimó dividiendo el número de veces que el transitorio de presión fue mayor que la presión de falla entre el número total de simulaciones (30,000)

Se consideraron los criterios para establecer cuando la falla se espera que ocurra en la forma de fuga grande, fuga pequeña o Ruptura para estos tipos de modos de falla.

También se tomó en cuenta el tiempo, estimando la confiabilidad anual en lapso de tiempo de 10 años a partir del momento de la inspección del ducto con equipo instrumentado.

3.6.1 Índice de falla en cada sección del ducto

Se estimó el índice de falla anual a partir de los valores de probabilidades de falla de cada defecto, seguido de la probabilidad de falla de la sección que contiene a estos defectos y después de la probabilidad de falla anual de la sección. Se estimó el índice de falla para cada uno de los criterios de falla antes mencionados (fuga pequeña, fuga grande y ruptura). Se utilizó la ecuación (36) para la estimación del índice de falla de cada sección a partir de la probabilidad anual de falla de la sección (ecuación 37) y su longitud. Se tuvo en cuenta que se debe realizar el análisis para un periodo de tiempo de diez años. La Fig. 28 muestra los pasos seguidos en el proceso de la estimación del índice de falla en cada sección y su evolución en el tiempo a partir de la fecha de inspección en línea del ducto.

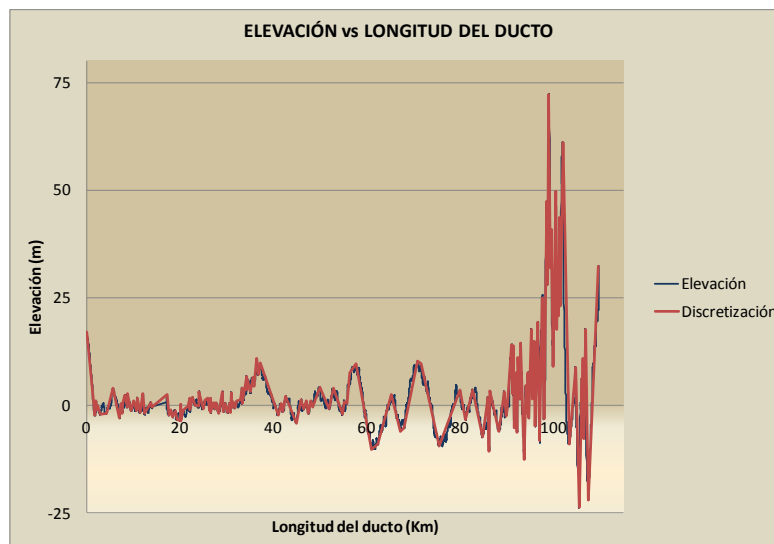
Capítulo 4- RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Presión Estacionaria

En el capítulo anterior se describieron los pasos para realizar la experimentación relacionada con la estimación de la confiabilidad de ductos debido a transitorios de presión utilizando la simulación de fluidos. En este capítulo se presentarán los resultados más significativos del trabajo, dando un análisis en cada caso.

El desarrollo experimental inicia con la recopilación de la información del Oleoducto de 36" D.N. necesario para ejemplificar la metodología. Los resultados de esta sección se centraron específicamente en obtener el Trazo Perfil de las alturas del ducto a lo largo de su recorrido. El primer resultado que se muestra es la discretización del perfil de las alturas del ducto. La finalidad de discretizar el trazo perfil, es reducir la cantidad de información que se genera por las diferentes alturas que se presentan a lo largo del ducto. La discretización ayudó a simplificar el diagrama.

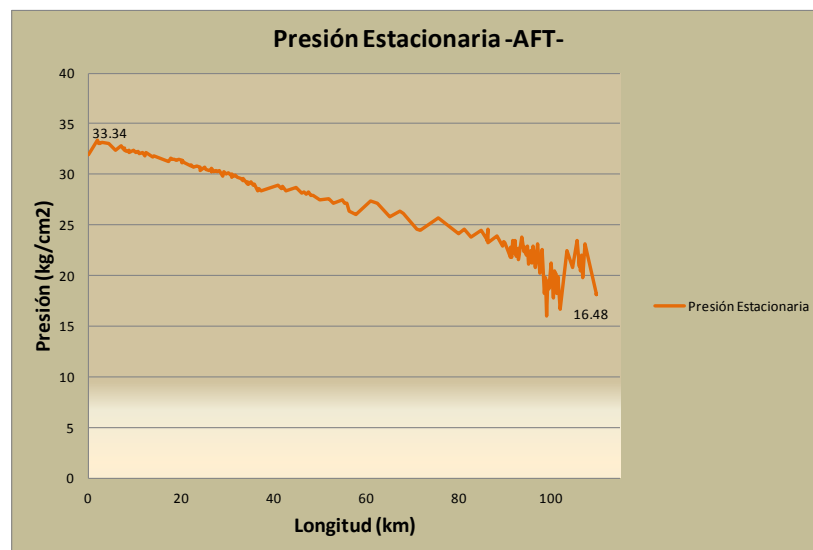
La Gráfica 3 muestra la discretización del ducto, la cual conlleva principalmente a la reducción de nodos (cambios de altura) pasando éstos de 4,590 a 160.



Gráfica 3.- Muestra la discretización del perfil de alturas del oleoducto.

La discretización de las alturas con exactitud el perfil de alturas que reporta el equipo instrumentado. La discretización fue de gran utilidad a la hora de realizar las simulaciones, al reducir drásticamente los tiempos de simulación y ayudó a descartar los pequeños cambios que no eran significativos para el análisis.

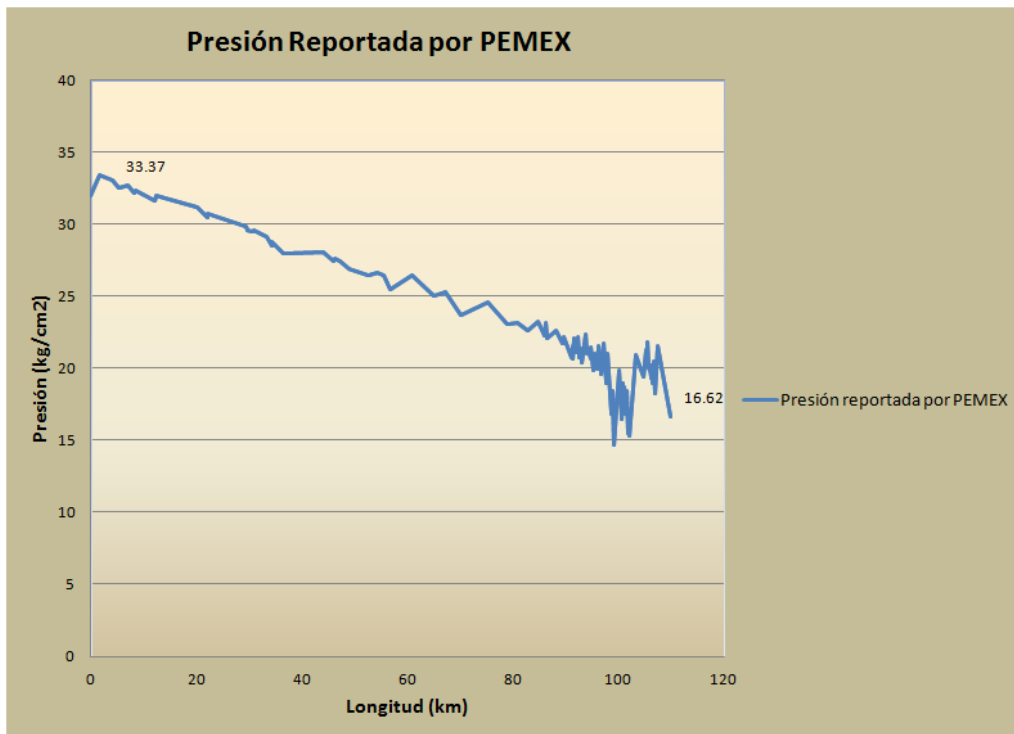
Una vez que se ingresó al sistema AFT Impulse, la discretización del perfil de alturas junto con las condiciones límite del ducto y las respectivas definiciones de los componentes estructurales, se simuló el estado estacionario. Los resultados de este análisis se presentan en la Gráfica 4. Para saber qué tan bien se realizó la simulación, fue necesario realizar dos acciones. La primera acción fue comparar los resultados que arrojó la simulación del estado estacionario con el perfil discretizado de las elevaciones del ducto. La segunda acción fue comparar el resultado de la simulación del estado estacionario (Gráfica 4) con las lecturas de presión que rutinariamente realiza PEMEX en campo (Gráfica 5).



Gráfica 4.- Resultado de la simulación del estado estacionaria

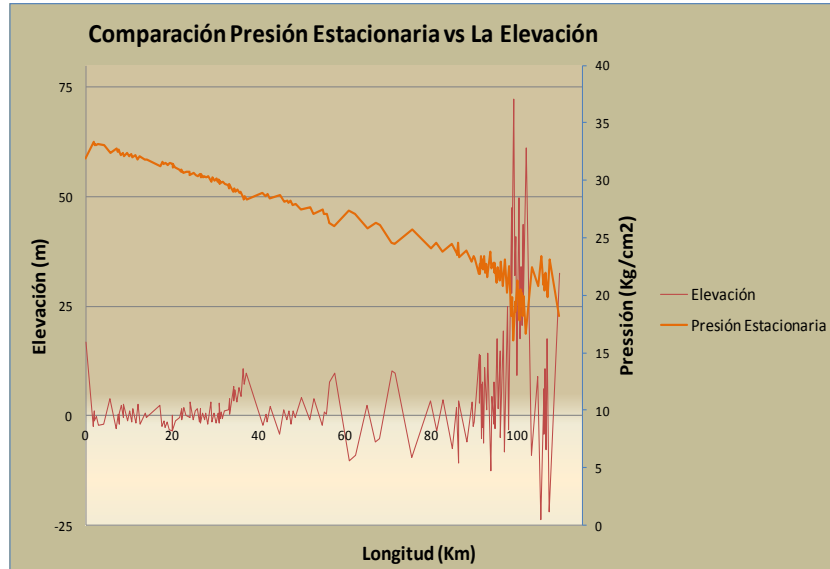
La primera acción que se llevó a cabo para verificar que tan bien se realizó la simulación, fue analizar el comportamiento de la simulación de la presión estacionaria (Gráfica 4) con respecto a las elevaciones del ducto (Gráfica 3). Los resultados del comparativo se

muestran en la Gráfica 6. Se observó como el resultado de la simulación tiene un comportamiento de reflexión con relación al perfil de elevaciones. En otras palabras, cuando la presión aumenta el perfil de alturas disminuye y si la presión estacionaria decrece el perfil aumenta, lo que tiene su explicación en la ecuación de Bernoulli. Las oscilaciones que presentan entre los kilómetros 90 y 110 se deben a la orografía del suelo en el cual el oleoducto está enterrado y por consecuencia el perfil de presiones muestra el mismo tipo de variación, pero en proporción especular.

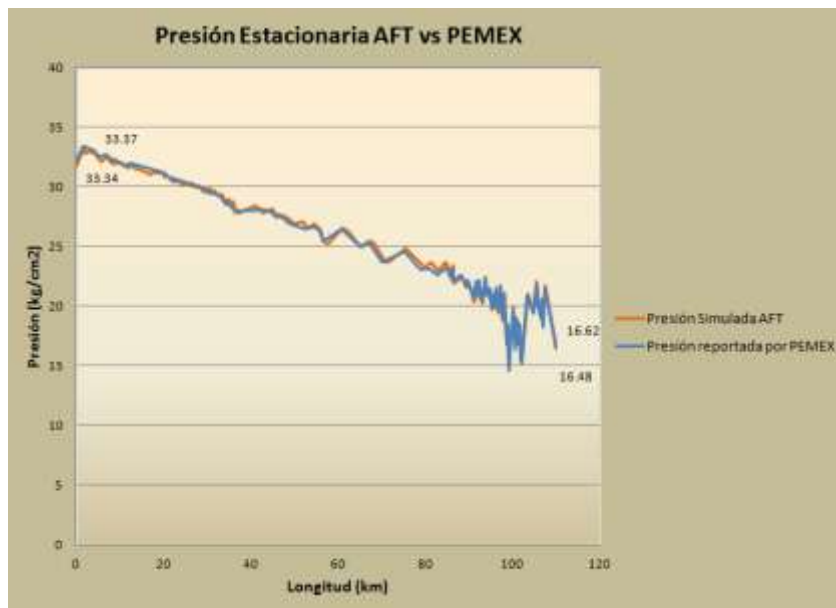


Gráfica 5.- Perfil de presiones registradas en campo.

La segunda acción que se realizó para visualizar qué tan bien el sistema AFT Impulse realizó la simulación de la presión estacionaria, fue comparar los resultados de la simulación en el estado estacionario (Gráfica 4) y las presiones que fueron reportadas en campo por PEMEX para este ducto (Gráfica 5).



Gráfica 6.- Comparativo de presión estacionaria y discretización de alturas



Gráfica 7.- Comparativo de presión estacionaria simulada y real.

Cuando se comparan de forma gráfica las presiones estacionarias (Gráfica 7), se puede observar como la presión que genera el simulador está muy cercana a las mediciones de dicha presión en campo. Tomando en cuenta que son 76 las lecturas que reporta PEMEX a lo largo del ducto y que la simulación genera 160 registros, al momento de comparar ambas presiones se toman los registros que estén lo más cercanos a los kilometrajes

donde se realizaron las mediciones en campo. Los detalles numéricos de los resultados presentados en la Gráfica 7 se incluyen en el ANEXO I Tabla B.

Al hacer un análisis con mayor detalle sobre estos resultados (ANEXO I Tabla B) se puede concluir lo siguiente:

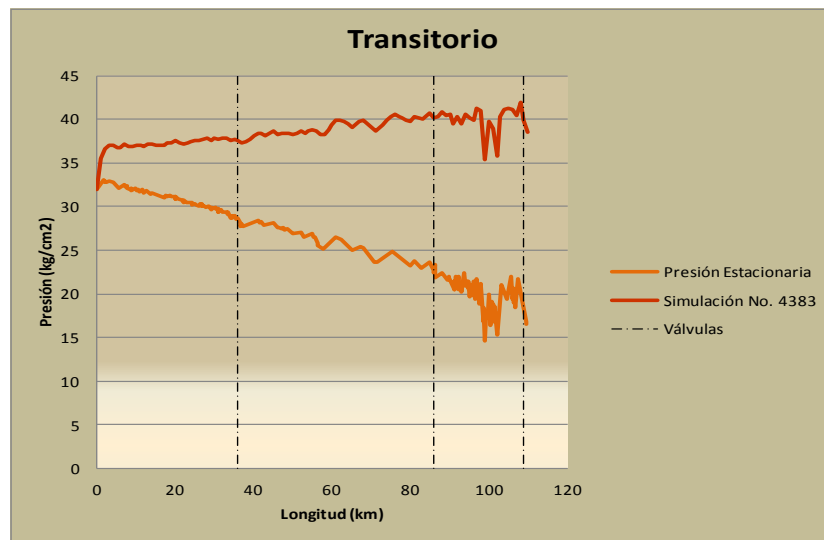
- Ambos perfiles de presión tienen su máximo de presión alrededor de $33.3 \frac{kg}{cm^2}$ en las proximidades del km 1+170; notar que la 1+170 es una notación utilizada por los operadores de ductos, la cual se traduce a la posición 1,170 m.
- La presión de salida para ambas presiones estacionarias está alrededor de los $16 \frac{kg}{cm^2}$. Con una diferencia porcentual de menos del 1%.
- Más del 82% de las lecturas reales tienen una diferencia menor del 1% con respecto a la simulación del estacionario.
- Cerca del 12% de las lecturas tienen una diferencia mayor al 1% y menor al 3%.
- Alrededor del 6% de las lecturas tienen una diferencia mayor al 3%. Cabe mencionar que los kilometrajes asociados, tanto a las lecturas de presión como a las presiones simuladas, tienen una diferencia entre 9 y 45 metros de diferencia.

Al verificar que los resultados de simular la presión estacionaria van de acuerdo a la teoría y además coinciden con las lecturas en campo, se puede determinar que el sistema de cómputo para la simulación de fluidos en tuberías produce una simulación aceptable para el estado estacionario. Esto de gran utilidad debido a que será la simulación base para el resto de las simulaciones que se realizaron. También es importante mencionar que esta comparación se puede realizar debido a que las presiones extremas generadas por transitorios de presión no cuentan con registros históricos en PEMEX ni pueden ser provocadas en campo debido al alto peligro de falla que implican.

4.2 Resultados de la Simulación de Transitorios

Tomando como base la Tabla 5, en la cual se muestran los componentes estructurales del ducto con sus respectivos estados, se calcula el total de combinaciones posibles para conocer el número y tipo de simulaciones a realizar. Los detalles de las 4,394 combinaciones consideradas se pueden consultar en el ANEXO I Tabla C.

A continuación se muestran los resultados de los transitorios más significativos teniendo en cuenta que describir el resultado del total de simulaciones es impráctico.



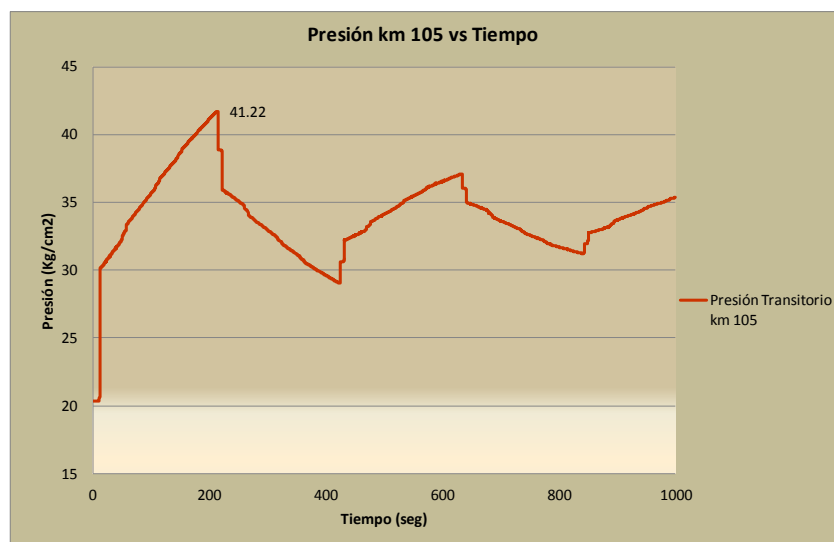
Gráfica 8.- Presión transitoria de la simulación 4,383.

La simulación No. 4383 hace referencia a la combinación en la cual están involucrados los estados donde la bomba está encendida, las primeras dos válvulas se encuentran abiertas y la tercera cierra a 180 segundos de modo lineal (función g_i). El resultado de simular la combinación 4383 se muestra en la Gráfica 8, en la cual se realiza el comparativo con la presión estacionaria de tal forma que se evidenció la magnitud relativa del incremento de la presión al interior del ducto.

Téngase en cuenta que el transitorio de presión que se estima a través de la simulación es la envolvente de las presiones máximas que se genera al interior del ducto, es decir, cada

punto del transitorio de presión es generado por el máximo de la envolvente de la onda de presión asociada al golpe de ariete.

A continuación se muestra un gráfico en el cual se puede observar de mejor manera lo anteriormente expuesto. La presión máxima que se genera en el km 105 es de 41.22 kg/cm² en un tiempo de simulación de un poco más de 200 segundos. Si se remite a la Gráfica 8, específicamente al km 105, la presión que se registra es la misma y esto ocurre para cada punto en el ducto.



Gráfica 9.- Presión transitoria máxima en el km 105, para la simulación 4383.

La simulación 4383 que se refiere al momento en que la bomba está encendida y se cierra la última válvula de forma rápida de modo lineal, lo que genera un incremento de presión a lo largo de todo el ducto. En este evento se debe de tener mayor detenimiento debido a que el incremento de la presión involucra la longitud total del ducto. Al hacer un análisis en 5 puntos como se presenta en la Tabla 9, se observa cómo va incrementándose la presión y en tan solo la quinta parte del ducto se visualiza un incremento considerable del 22%. Es importante señalar al final del ducto donde se encuentra un incremento del 134% con respecto a la presión estacionaria.

Es claro cómo el transitorio conlleva incrementos considerables de presión. Específicamente, esta simulación realiza un incremento en la presión de más del 100% en la parte final del ducto, lo cual implica un incremento considerable en la probabilidad de falla del ducto por ruptura o fuga grande.

km	Presión Estacionaria (kg/cm ²)	Presión transitoria kg/cm ²	Incremento Porcentual (%)
0	31.97	31.97	0
22	30.4	37.1	22
44	28.1	38.4	37
66	24.13	39.38	63
88	22.3	40.8	83
109.6	16.48	38.5	134

Tabla 9 .- Comparativo de presiones para la simulación 4383

Es cierto que este evento genera las mayores presiones al interior del ducto, pero al haber más de 4300 simulaciones existen otros eventos que también generen transitorios de presión que pueden comprometer la integridad mecánica del ducto, especialmente en aquellas secciones que presentan defectos de corrosión. Como la finalidad del trabajo no es mostrar el total de transitorios simulados, se presentarán algunos resultados de forma general y se comentará con mayor detenimiento en aquellos aspectos más importantes de las simulaciones relacionados con el impacto de los transitorios de presión encontrados en la disminución de la confiabilidad del ducto.

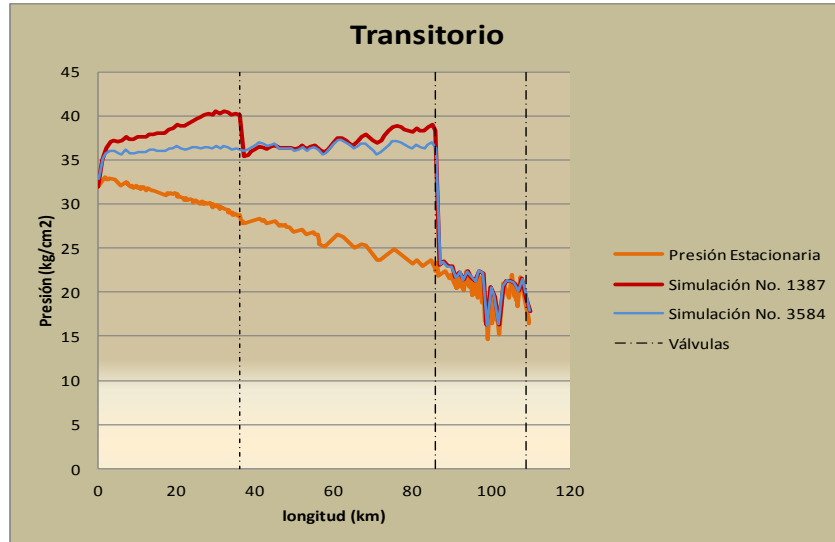
Uno de los eventos a los cuales se hace referencia en el párrafo anterior es el identificado con el número 1387, cuya combinación de los estados se muestra en la Tabla 1 y los resultados se presentan en la Gráfica 10. Nótese que el cierre de la válvula dos a 180 segundos es el evento que genera el transitorio de presión, el cual inicia a la altura de dicha válvula. El transitorio viaja hacia el al origen del ducto. Como se puede observar, esto genera un nuevo transitorio, debido a que la onda, cuando va de regreso al punto donde se generó el transitorio para iniciar la segunda parte del golpe de ariete, se topa con el cierre de la primera válvula. Aunque este cierre es más lento con relación a la

segunda válvula, la onda no termina de atenuarse y por ello se observa el mencionado incremento de presión.

Simulación No.	Bomba	Válvula 1 (cierre)		Válvula 2 (cierre)		Válvula 3 (cierre)	
		Tiempo (seg.)	Modo	Tiempo (seg.)	Modo	Tiempo (seg.)	Modo
1387	Encendida	560	h3	180	h1	560	h3
2384	Encendida-Apagada	560	h3	180	h1	560	h3

Tabla 10.- Estados involucrados para las simulaciones 1387 y 2384.

En los resultados asociados a la simulación número 2384, la cual tiene como diferencia el estado de la bomba que pasa de estar trabajando a apagada, se observa el mismo fenómeno pero con un incremento de presión relativamente menor en relación a los resultados de la simulación 1384. Los resultados se presentan en la Gráfica 10, en la cual se puede observar cómo el transitorio se genera al momento de cerrar la segunda válvula. Se puede apreciar que un nuevo transitorio se intenta generar cuando la onda reflejada encuentra la primera válvula cerrada. Sin embargo, dicho transitorio pero no se termina de presentar debido a que la presión no se sigue incrementando ya que la bomba se ha apagado. Sin embargo, el transitorio que se genera produce incrementos de presión de más del 50% con respecto a la presión estacionaria en ciertos puntos del ducto.



Gráfica 10.- Resultados de las simulaciones 1387 y 3584

Nótese que la última válvula cierra con el mismo tiempo y de la misma forma que la primera válvula, pero que esta condición no se generó un incremento de presión como se observó y sí al inicio del ducto. En el análisis que se realizó para los cierres de válvula 560 segundos, no se presentaron incrementos de presión cuando estos ocurren por si solos, pero sí cuando se ven involucrados tiempos de cierre más cortos.

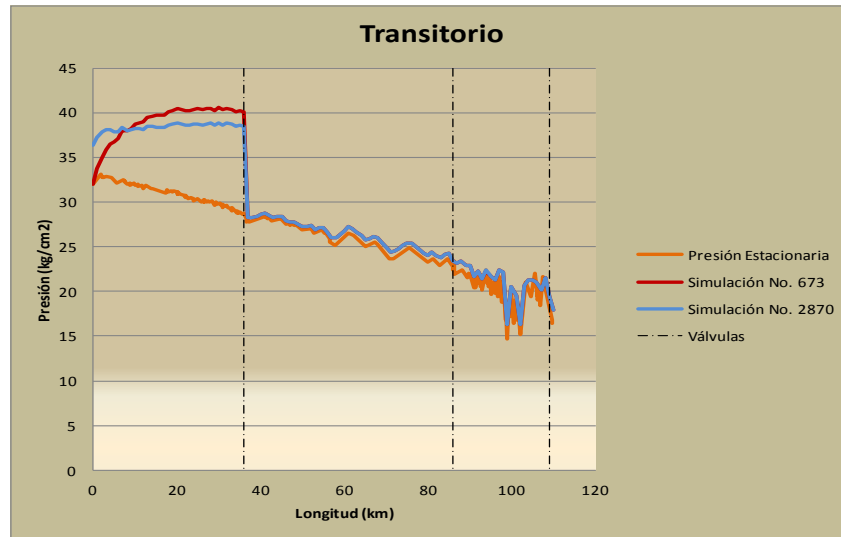
A continuación se presentan los resultados de las simulaciones identificados con el número 673 y 2870, Los estados que definen estas simulaciones están descritos en la siguiente tabla. Los resultados se muestran en la Gráfica 11.

Simulación No.	Bomba	Válvula 1 (cierre)		Válvula 2 (cierre)		Válvula 3 (cierre)	
		Tiempo (seg)	Modo	Tiempo (seg)	Modo	Tiempo (seg)	Modo
673	Encendida	270	f2	-	Abierta	4860	f4
2870	Encendida-Apagada	270	f2	-	Abierta	4860	f4

Tabla 11.- Estados involucrados para las simulaciones 673 y 2870.

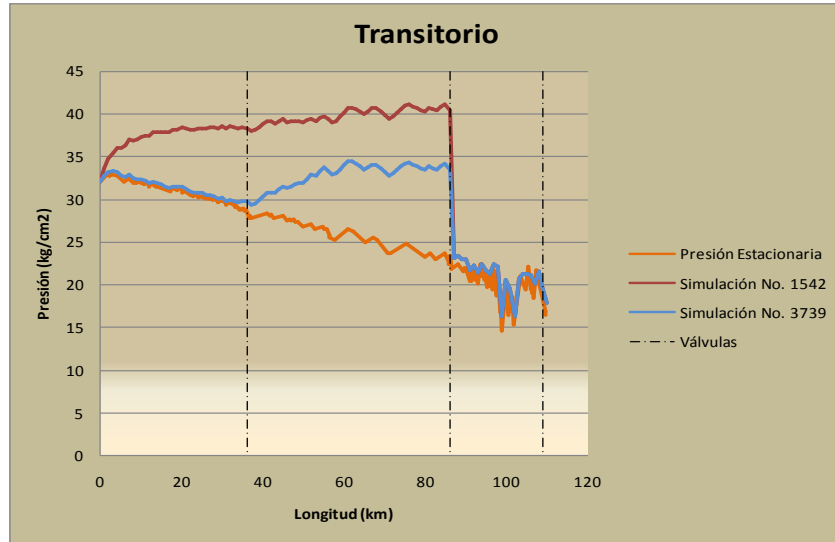
Al observar detenidamente los resultados que arrojan las simulaciones, se observa que el transitorio se presenta al momento de cerrar la primera válvula. Para un tiempo de cierre de 270 segundos se observa como la presión se incrementa de forma notable al simular

ambos eventos, llegando a presiones por arriba de los 40 kg/cm^2 . Lo notable en este par de simulaciones es el incremento de presión al inicio del ducto, específicamente en el resultado de la simulación 2870. El incremento que se observa es de más de 4 kg/cm^2 que es alrededor de un 15% de incremento con respecto a la presión estacionaria.



Gráfica 11.- Resultados de la simulación 142 y 2339.

El incremento de la presión al inicio del ducto se debe en gran medida a que en el momento que se cierra de la primera válvula, la onda de presión se desplaza con gran energía hacia el inicio del ducto. Al momento de llegar al inicio del ducto se encuentra que la bomba está apagada. Se debe tomar en cuenta que, por condiciones de simulación, se definieron las propiedades de apagado como un modelo sin inercia. Todo esto implica que, la onda llegue al inicio con casi la misma energía con la que se originó. Es por ello que se observa como un valor relativamente constante de incremento de presión en esta zona del ducto. Si las propiedades de apagado de la bomba se hubieran definido con inercia, la bomba generaría un fenómeno de turbina reingresando el fluido al ducto, lo que generaría un mayor transitorio.



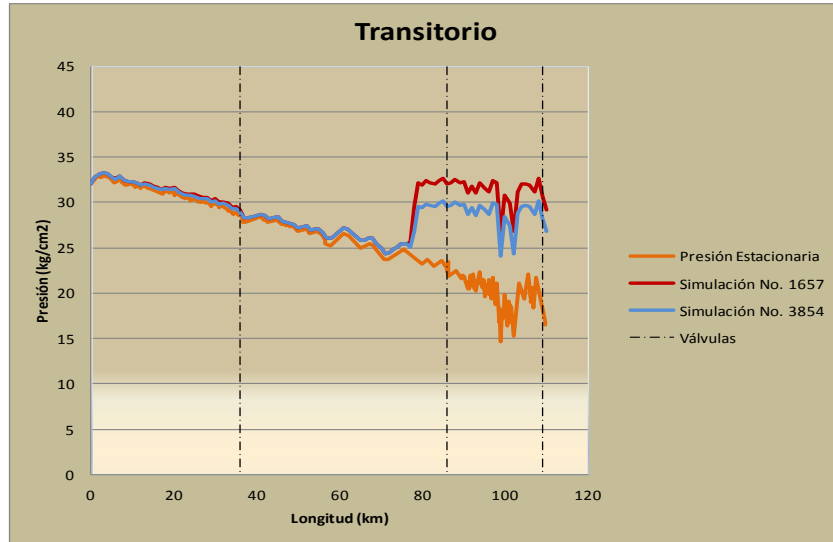
Gráfica 12.- Resultados de las simulaciones 1542 y 3739.

Los resultados que a continuación se presentan tienen como finalidad continuar mostrando en términos generales los estados producen transitorios de presión en el ducto como resultado de las acciones de manipulación de sus componentes. En ese sentido se analiza los resultados de las simulaciones 1657 y 3854. Los estados que lo conforman se muestran en la Tabla 12. Los transitorios que se observan se generan al cerrar la tercera válvula en un tiempo de 270 segundos y las dos primeras cierran a un tiempo mayor.

Simulación No.	Bomba	Válvula 1 (cierre)		Válvula 2 (cierre)		Válvula 3 (cierre)	
		Tiempo (seg)	Modo	Tiempo (seg)	Modo	Tiempo (seg)	Modo
1657	Encendida	4860	f4	4860	g4	270	h2
3854	Encendida-Apagada	4860	f4	4860	g4	270	h2

Tabla 12.- Estados Involucrados para las simulaciones 1657 y 3854.

Los transitorios que se generan no llegan al inicio y la onda de presión pierde energía. El cierre de las primeras válvulas, si bien resta energía a la onda del transitorio, no interfiere el proceso. Sin embargo, el incremento de la presión llega a ser de más del 75% con respecto a la presión estacionaria. Cuando la bomba se apaga, se genera el incremento de presión pero éste resulta menor que el observado cuando la bomba está encendida.



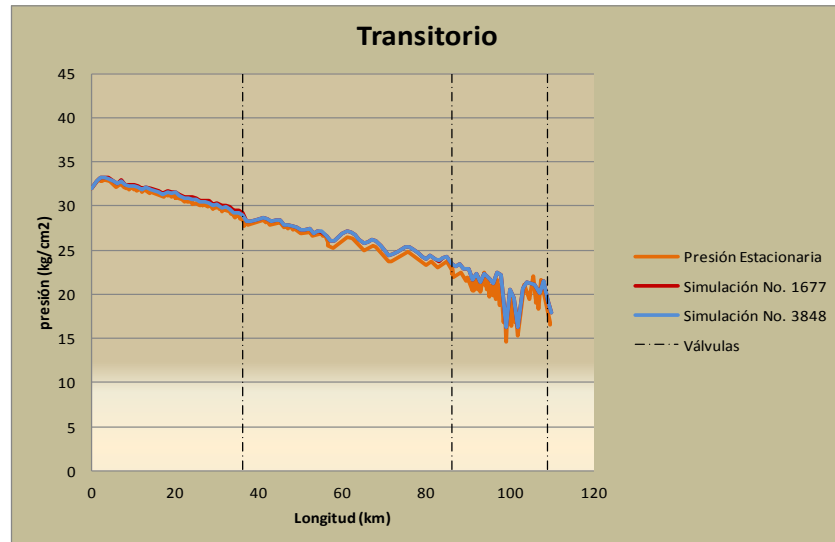
Gráfica 13.- Resultados de la simulaciones 1657 y 3854

Por último, se presenta el resultado que se obtuvo cuando se consideró que las válvulas cierran en un tiempo de 4860 segundos. Para ello se observan los resultados de las simulaciones 1677 y 3848, cuyos estados se muestran en la tabla siguiente.

Simulación No.	Bomba	Válvula 1 (cierre)		Válvula 2 (cierre)		Válvula 3 (cierre)	
		Tiempo (seg)	Modo	Tiempo (seg)	Modo	Tiempo (seg)	Modo
1677	Encendida	4860	f4	4860	h4	-	abierta
3848	Encendida-Apagada	4860	f4	4860	h4	-	abierta

Tabla 13.- Estados involucrados para las simulaciones 1677 y 3848.

Para este par de simulaciones no se presenta transitorio alguno. Las válvulas cierran en un tiempo 4860 segundos y se observa que, al estar involucrado este tiempo de cierre con alguna otra simulación, no se presentan incrementos de presión al interior del ducto.



Gráfica 14.- Resultados de las simulaciones 1677 y 3848

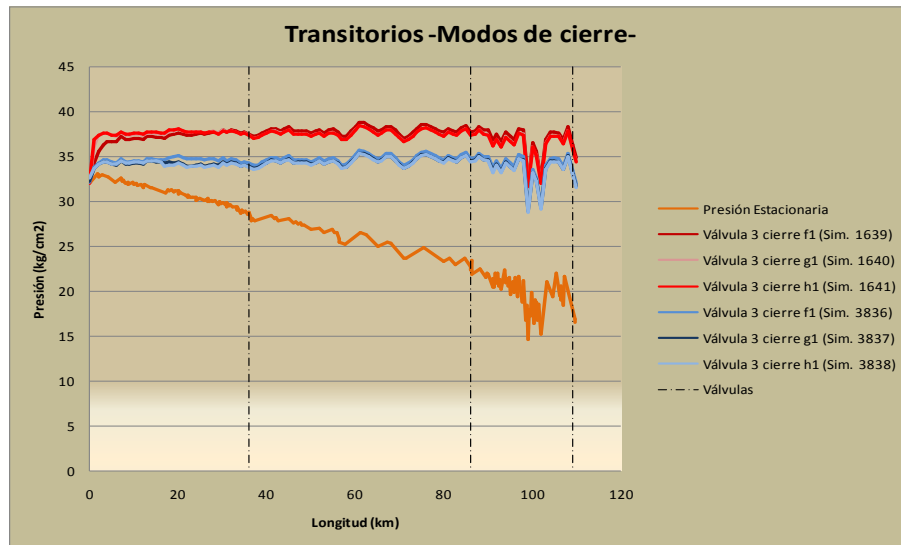
Sin embargo, es interesante mostrar este resultado para hacer ver que el cierre abrupto de válvulas es la acción de manipulación de componentes del ducto que genera los incrementos de presión al interior del mismo. Por otro lado, es necesario comentar que se realizaron simulaciones con tiempos de cierre para las válvulas que van desde los 1080 a los 10800 segundos. Para estos tiempos de cierre, no se presentaron incrementos de presión al interior del ducto. Sin embargo, una vez que se ha generado el transitorio por otras condiciones, estas manipulaciones contribuyen a la atenuación de los transitorios de presión al interior del ducto.

Una de las preguntas que se planteó al inicio de las simulaciones era si el modo de cierre de las válvulas tiene que ver directamente con la magnitud y carácter del transitorio de presión. En este sentido la Gráfica 15 muestra la relación entre el modo de cierre de válvulas con el incremento de la presión que se produce debido al transitorio de presión. Para ello se toman seis simulaciones de que producen transitorios significativos (1639, 1640, 1641, 3836, 3837 y 3838), cuyos estados se muestran en la Tabla 14.

Simulación No.	Estado de la bomba	Válvula 1 (cierre)		Válvula 2 (cierre)		Válvula 3 (cierre)	
		Tiempo (seg)	Modo	Tiempo (seg)	Modo	Tiempo (seg)	Modo
1639	Encendida	4860	f4	4860	h4	180	f1
1640	Encendida	4860	f4	4860	h4	180	g1
1641	Encendida	4860	f4	4860	h4	180	h1
3836	Encendida-Apagada	4860	f4	4860	h4	180	f1
3837	Encendida-Apagada	4860	f4	4860	h4	180	g1
3838	Encendida-Apagada	4860	f4	4860	h4	180	h1

Tabla 14.- Estados involucrados en las simulaciones de modo de cierre de válvula.

De la tabla anterior se puede observar que el transitorio se genera al simular el cierre de la tercera válvula pero la forma de cierre es diferente. Es decir, se muestran los tres diferentes modos de cierre los cuales están descritas por las funciones f1, g1 y h1. (según las ecuaciones 38, 39, 40 y 41). Los resultados de las simulaciones se muestran en la Gráfica 15.



Gráfica 15.- Resultados de las simulaciones con tres modos de cierre

Ya antes se ha comentado sobre los transitorio que se pueden genera por al cerrar las válvulas con el tiempo más corto posible. Lo que se pretende ahora es mostrar que el

transitorio solo depende del tiempo de cierre y no del modo de cierre de la válvula. La Gráfica 15 muestra los tres diferentes modos de cierre que se describen en el procedimiento experimental. El modo lineal, que se describe por la función g_1 , es el que describe tiene asociado un perfil de presión diferente con respecto a los modos f_1 y h_1 , principalmente en los primeros 30 kilómetros del ducto. Conforme el transitorio recorre todo el ducto estas formas de cierre no influyen de manera importante sobre el incremento de la presión al interior del ducto. Esto se debe a que el transitorio está relacionado con el paro abrupto del fluido que viaja al interior del ducto.

4.3 Funciones de distribución para los transitorios de presión.

Como bien se mencionó en el procedimiento experimental, es necesario hacer un análisis sobre los resultados que arrojan las simulaciones y como se distribuyen estadísticamente las presiones generadas por los transitorios a largo del ducto.

Se determinó seccionar el ducto para realizar el análisis experimental, de tal forma que se eligieron 23 intervalos de longitudes diferentes dentro de los 109.6 kilómetros con los que cuenta el ducto. En este trabajo se presentan los resultados de 12 de estas 23 secciones. Estos 12 secciones corresponden a tres al inicio (km 2, km 5, km 9), tres a la altura de la primera válvula (km 33, km 36, km 41), tres a la altura de segunda válvula (km 77, km 83, km 90) y, por último, tres a la altura de la tercera válvula (km 99, km 104, km 109.6). Nótese que cada kilometraje a la altura de las válvulas se seleccionó antes y después de cada una de ellas a excepción de la tercera válvula debido a que ésta se encuentra al final del ducto. Cabe mencionar que los resultados correspondientes a los 11 secciones restantes (km 13, km 17, km 21, km 25, km 29, km 47, km 53, km 65, km 71, km 94) no se realizó un análisis más detallado solo se presentaran los resultados finales.

A continuación se presentan los resultados de las primeras tres secciones (kilómetros 2, 5 y 9), los cuales se muestran en la Gráfica 16, Gráfica 17 y Gráfica 18, respectivamente. Las

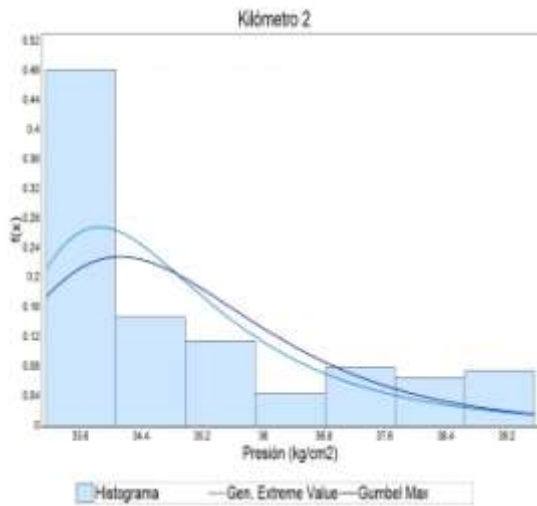
gráficas correspondientes a los primeros tres kilometrajes contienen los resultados del total de simulaciones (4,394) con las cuales se construyeron los histogramas de transitorios de presión superiores a la estacionaria para cada sección.

Los histogramas para estas tres primeras secciones comprenden las presiones que se presentan con mayor frecuencia. Para la sección 2, se observa que las presiones con mayor frecuencia están alrededor de los 33.6 kg/cm^2 , para la sección 5 en torno de los 32.8 kg/cm^2 y para la sección 9 cerca de los 32.5 kg/cm^2 . Por otro lado al remitirse a la gráfica del estacionario (Gráfica 4) se puede verificar que las presiones 33.6 kg/cm^2 , 32.8 kg/cm^2 y 32.5 kg/cm^2 , son parte del perfil que describe la presión estacionaria en las secciones 2, 5 y 9.

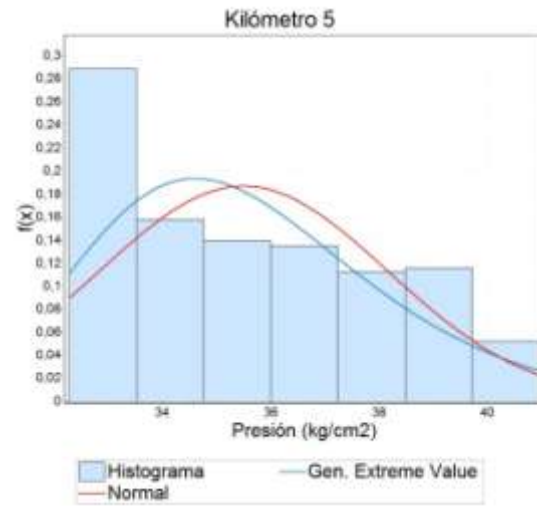
Se puede concluir que las presiones estacionarias tienen mayor frecuencia y por tanto las presiones que están por arriba de esta corresponden a los transitorios de presión que se generan con menos frecuencias para cada uno de las secciones.

De los mismos histogramas se puede ver que los transitorios de presión van aumentando, llegando cerca de los 39 kg/cm^2 para la sección 2, y más de los 40 kg/cm^2 para las secciones 5 y 9. Al realizar un análisis de cuáles son los eventos cuyos resultados generan las mayores presiones, se encontró que son aquellos eventos donde la bomba está encendida en combinación con el cierre de las válvulas a tiempos rápidos, es decir a 180 y 240 segundos. Los eventos que involucran el estado donde la bomba pasa de encendida a apagada en combinación con el cierre de la primera válvula a los tiempos 180, 240 y 560 también tienen una gran influencia en la generación de transitorios de presión.

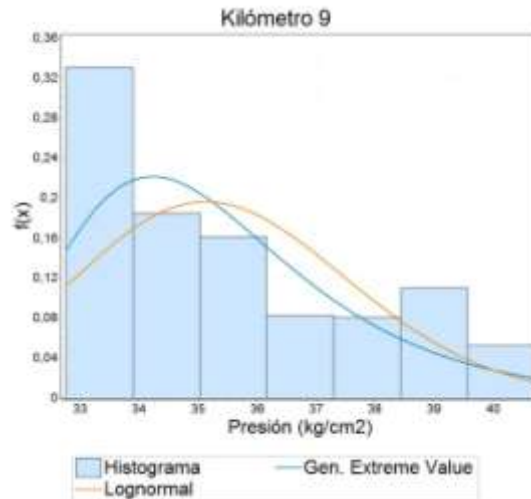
Dentro de estos tres primeros histogramas se observó que las presiones estacionarias en la sección dos tienen mayor frecuencia. Esto ocurre porque en la zona inicial del ducto el golpe de ariete no se presenta cuando interviene el estado de bomba encendida, pero sí se presenta el transitorio de presión cuando la bomba pasa de encendida a apagada.



Gráfica 16.- Resultados de 4394 eventos en la sección 2.



Gráfica 17.- Resultados de 4394 eventos en la sección 5.

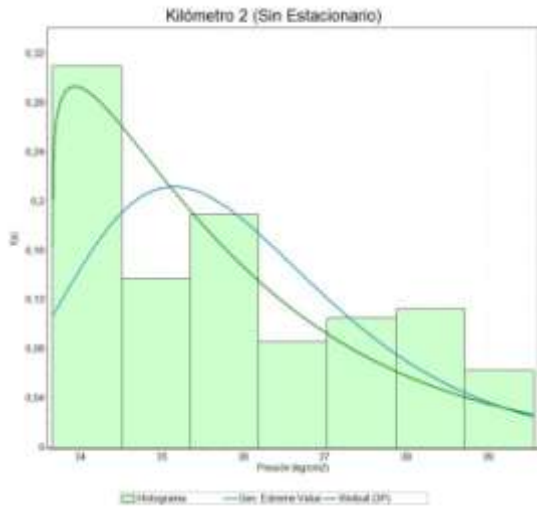


Gráfica 18.- Resultados de 4394 eventos en la sección 9.

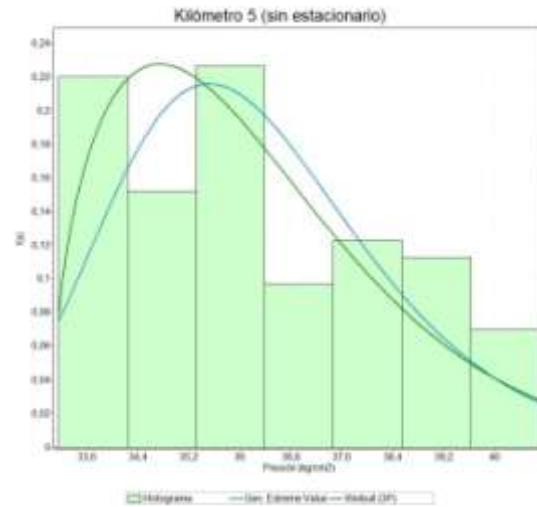
Mediante el sistema de cómputo llamado Easy Fit, se hace un ajuste de los histogramas a distribuciones continuas. Se consideraron para el ajuste las distribuciones continuas Normal, Exponencial, Generalizada de Valores Extremos, Weibull, Gumbel, Frechet y Log-normal. Las leyendas que aparecen en la parte inferior de cada gráfica hacen referencia al tipo de distribución que mejor se ajusta el histograma, usando el criterio Kolmogorov-Smirnov. En los histogramas correspondientes a las secciones 2 y 5, el mejor ajuste fue

una distribución de tipo Generalizada de Valores Extremos, para la sección 9 fue una distribución Log-normal.

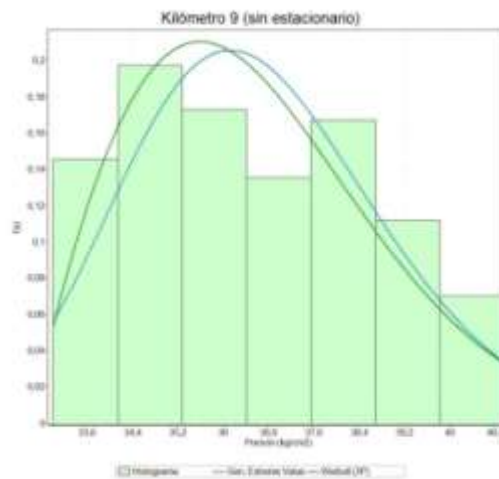
Ya se ha comentado antes que las presiones estacionarias asociadas a estos kilómetros se presentan con mayor frecuencia dentro del histograma, pero ¿Qué pasará si ahora se hace un análisis sin estos estacionarios?



Gráfica 19.- Resultados de 2883 eventos en la sección 2.



Gráfica 20.- Resultados de 2266 eventos en la sección 5.



Gráfica 21.- Resultados de 2266 eventos en la sección 2.

Al quitar los estacionarios que se encuentran dentro del resultado del total de simulaciones, se observa que el histograma cambia sustancialmente. Eso se puede ver en los resultados que se muestran en las Gráfica 19, Gráfica 20 y Gráfica 21.

Si bien es cierto que, se reduce el número de simulaciones involucradas, también es cierto que quedan los transitorios de presión y las distribuciones que estas presiones generen son las necesarias para continuar con el análisis. Los histogramas permiten visualizar cómo los transitorios de presión van creciendo paulatinamente conforme se realiza el análisis para las secciones que se van alejando del origen.

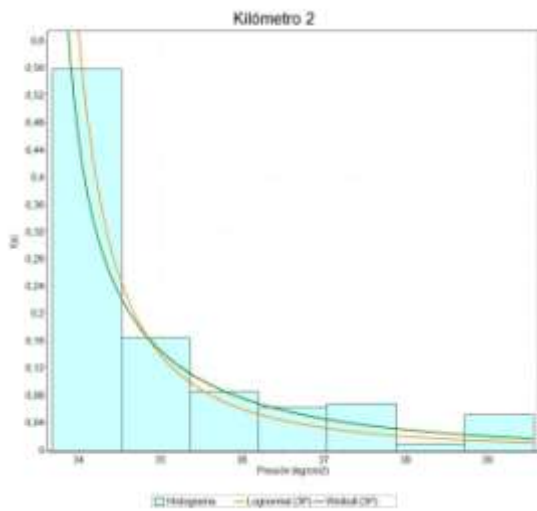
Usando la misma herramienta de ajuste, los tres histogramas presentan a la distribución Weibull como la distribución que mejor ajusta los transitorios de presión. El segundo mejor ajuste corresponde a la distribución Generalizada de Valores Extremos. Se puede observar que en la sección 9 ambos ajustes tienen una mayor cercanía.

Es importante hacer notar que existe una diferencia en la sección 9 de casi 36% entre los eventos que generan transitorios de presión en la sección 2 con respecto a lo que ocurre en la sección 5. Esto se debe a que en los primeros kilómetros la presión del transitorio se presenta debido al estado en el cual la bomba pasa de encendido a apagado. Como antes se comentó el incremento relativo de la presión con respecto a la presión estacionaria va aumentando a medida que aumenta la distancia en el ducto desde el origen. el incremento llega a ser de más del 25% en las primeras secciones. En las primeras secciones y mediante los histogramas asociados a las secciones 2, 5 y 11 se puede observar el incremento del transitorio de presión es de mayor magnitud.

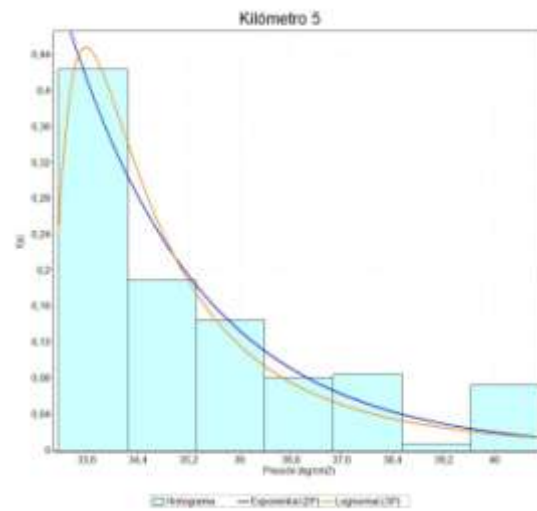
Antes de continuar con el análisis de los histogramas asociados a las presiones estacionarias, es necesario comentar que hasta este momento los eventos que generan los transitorios de presión y las presiones estacionarias están relacionados con el hecho de que tienen la misma probabilidad de ocurrencia (1/4394). En otras palabras el evento de que la bomba se apague mientras las válvulas están abiertas es igualmente probable al

evento donde la bomba está encendida y las válvulas están abiertas. Esto no es del todo cierto, ya que es más frecuente que la bomba esté encendida a que la bomba se apague. De este simple hecho se infiere que las probabilidades para los 4394 eventos no pueden ser iguales.

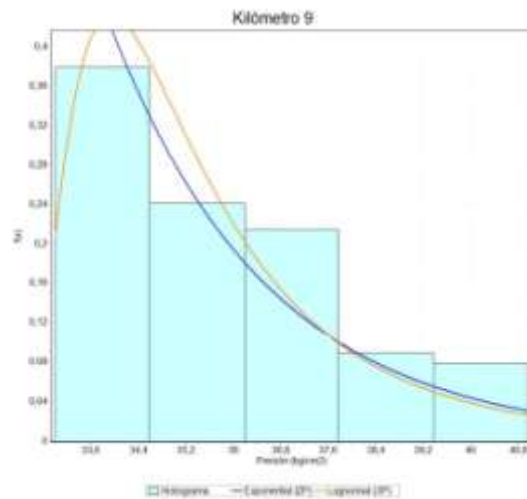
Por esta razón, el asignarle una probabilidad de ocurrencia a cada evento es relevante y de suma importancia para este trabajo.



Gráfica 22.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad en la sección 2.



Gráfica 23.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad en la sección 5.



Gráfica 24.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad en la sección 9.

Como se mencionó en Capítulo 2, el historial de fallas es de suma importancia ya que podría dar la pauta para asignar una frecuencia de que ocurra el evento. Sin embargo como esto ha sido difícil de cuantificar, o la información en algunos casos no es pública, se determinó asignar una frecuencia conforme a la experiencia tal y como se hizo referencia en la Sección 3.3.

Tomando en cuenta la Tabla 6, donde se le asignó una probabilidad a los estados, y considerando que son independientes, cada evento tendrá una probabilidad de ocurrencia diferente. Seleccionando sólo los eventos que generan transitorios por cada kilómetro y tomando en cuenta los pasos de la Sección 3.3, se obtuvieron los resultados que se muestran en Gráfica 22, Gráfica 23 y Gráfica 24. Estas gráficas cambian con respecto a los histogramas que se muestran en la Gráfica 19, Gráfica 20 y Gráfica 21. Esto se debe a que cada estado tiene una probabilidad de ocurrencia diferente y los estados cuya frecuencia es de 10^{-5} simplemente ya no aparecen en los nuevos -histogramas.

Las funciones de distribución a las cuales se ajustan los histogramas también cambian. El primer ajuste de los histogramas correspondientes a las secciones 2 y 5 se ajustan a una distribución Log-Normal y el segundo ajuste es de una distribución Weibul y Exponencial respectivamente. Sin embargo, el mejor ajuste para el histograma correspondiente a la sección 9 es a una distribución Exponencial y el segundo a una distribución Log-Normal. Por lo anterior, se utilizó el primer ajuste para estos kilometrajes.

La magnitud de los transitorios de presión no han cambiado, lo que sí ha cambiado es la ocurrencia relativa de éstos. De las mismas gráficas se observa como los transitorios de presión que están más cerca a la presión estacionaria se presentan con mayor frecuencia. Esto va de acuerdo con la realidad, ya que los incrementos de presión al inicio del ducto se presentan en mayor frecuencia pero con menor intensidad. Entre más cerca se esté del origen, las frecuencias de las presiones transitorias son mayores.

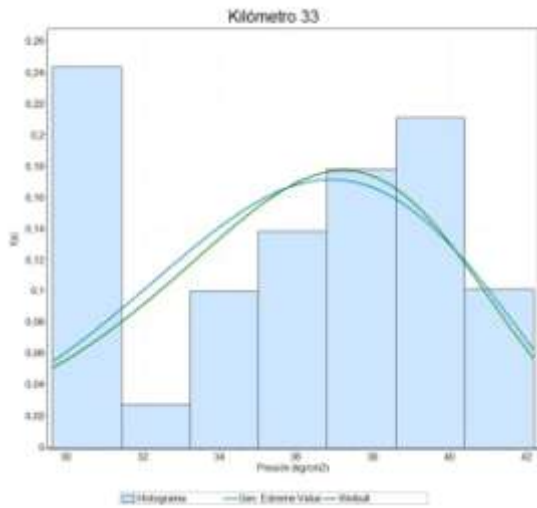
Con los histogramas que se presentan en la Gráfica 22, Gráfica 23 y Gráfica 24, se puede hacer un análisis más apegado a la realidad y por esta razón sus distribuciones se utilizaron como variables de carga para estas secciones del ducto, necesarias las mismas para llevar a cabo su análisis de confiabilidad estructural como se describió en la Sección 3.

Continuando con la exposición de resultados se presentan tres secciones alrededor de la primera válvula. Se seleccionaron de tal forma que la primera sección está antes de llegar a la primera válvula (kilómetro 33), la segunda sección a la altura de la primera válvula (kilómetro 36) y el último después de ésta (kilómetro 41).

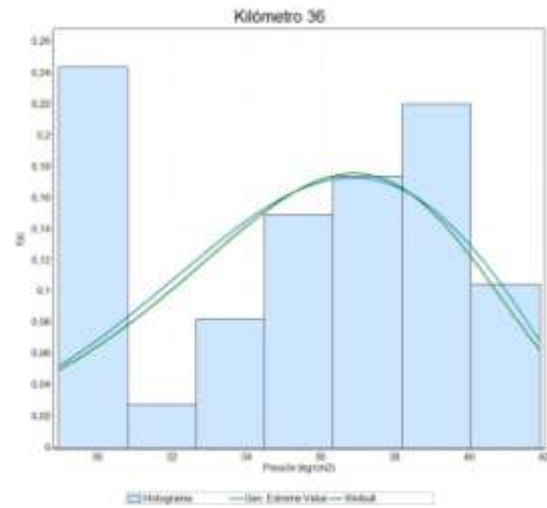
Al igual que en los resultados de los primeros kilómetros del ducto, primero se observó el resultado del total de las simulaciones, los cuales se muestran en la Gráfica 25, Gráfica 26 y Gráfica 27. Los resultados muestran que las presiones con mayor frecuencia se encuentran alrededor de las presiones 30.2 kg/cm^2 , 29.8 kg/cm^2 y 29.63 kg/cm^2 , para las secciones 33, 36 y 41, respectivamente. Estas presiones corresponden al estado estacionario conforme a lo que muestra la Gráfica 4.

De las gráficas correspondientes a esta sección, se observó que las presiones estacionarias en el kilómetro 41 son mayores con respecto a las que se presentan en los kilómetros 33 y 36. Los resultados del kilómetro 41 presentan cierta similitud con los resultados del kilómetro 2, en el sentido de que los estacionarios de ambos kilometrajes se presentan con mayor frecuencia y si se tiene en cuenta que la válvula se encuentra a la altura del kilómetro 36, se puede decir que las presiones estacionarias se generan debido a que el transitorio de presión generado por las válvulas 2 y 3 encuentran a la válvula 1 cerrada.

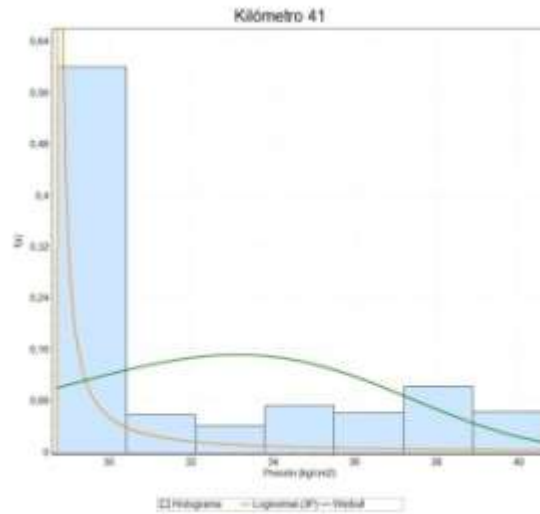
Por otro lado, los histogramas en los kilometrajes 33 y 36 tienen el mejor ajuste a una distribución del tipo Weibull y para el kilometraje 41 a una distribución Log-normal. El cambio de distribución entre estos kilometrajes tiene que ver con la frecuencia de los eventos que generan presiones cercanas a los valores de la presión estacionaria.



Gráfica 25.- Resultados de 4394 eventos en km 33.



Gráfica 26.- Resultados de 4394 eventos en km 36.



Gráfica 27.- Resultados de 4394 eventos en km 41.

De los histogramas correspondientes a los kilometrajes 33, 36 y 41, se puede ver que los transitorios de presión llegan muy cerca de los 41 kg/cm², es decir, en estas secciones del ducto los transitorios de presión llegan a incrementarse hasta en un 45% con respecto al valor del estado estacionario. De los mismos histogramas, se puede ver que los transitorios de presión que están alrededor de los 39 kg/cm² tienen una mayor frecuencia.

Sin embargo, para el kilómetro 41 el número de simulaciones en este rango es menor que para los otros dos kilómetros.

Los eventos que originan los transitorios de presión en los kilómetros 33 y 36 están relacionados con los estados que involucran a la bomba encendida y a la primera válvula con cierres en los tiempos de 180, 240 y 560 segundos.

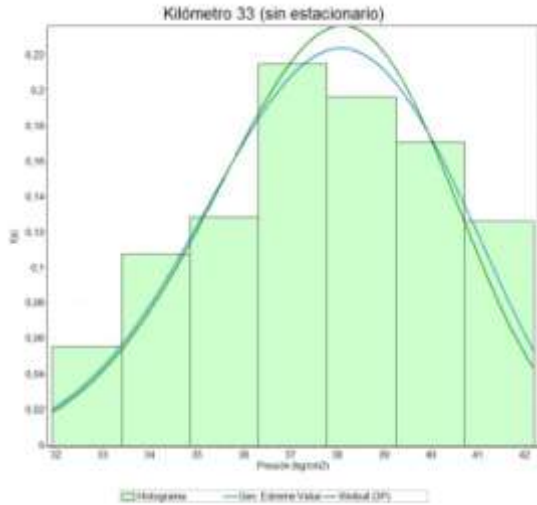
Los histogramas que se muestran en las Gráfica 25 y Gráfica 26 son muy parecidos, ya que las presiones que se generan en kilometrajes cercanos no cambian mucho. Esta es una razón por la cual se determinó hacer el análisis por secciones y no por kilometraje.

Ahora bien, si se hace un análisis sobre los transitorios de presión, se puede visualizar qué tanto cambian los histogramas y las distribuciones a las cuales se ajustan. Los resultados se muestran en las Gráfica 28, Gráfica 29 y Gráfica 30. Al igual que en los kilómetros iniciales la forma del histograma cambia apreciablemente. Sin embargo, las distribuciones a las que se ajustan los resultados no cambian mucho, el cambio más significativo se observa en el kilómetro 41 pasando de una distribución Log-normal a una distribución Generalizada de Valores Extremos.

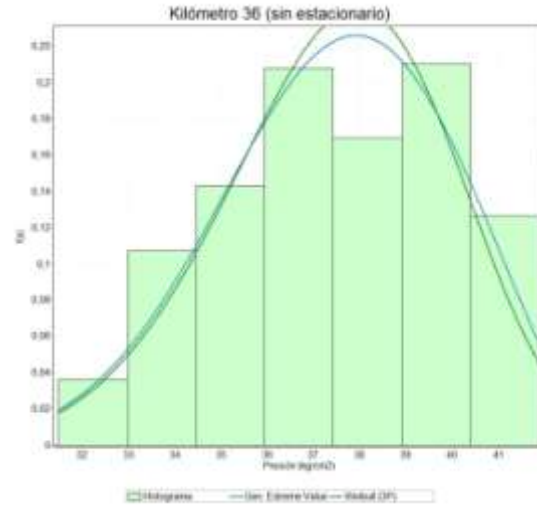
Los transitorios de presión que se observan a la altura de la primera válvula van incrementándose tanto en magnitud como en frecuencia con respecto a los kilómetros iniciales. Esto se debe a la cercanía de la válvula y los diferentes estados que intervienen. El incremento de magnitud y frecuencia, provocan un cambio en las distribuciones de ajuste.

De los histogramas asociados a los transitorios de presión se puede determinar la cantidad de eventos que generan estos transitorios. Los datos que se usan para los kilómetros 33 y 36 están en alrededor de los 3300 eventos. Sin embargo, los datos que corresponden al kilómetro 41 caen de manera significativa en cantidad hasta cerca de 1800. Esto confirma

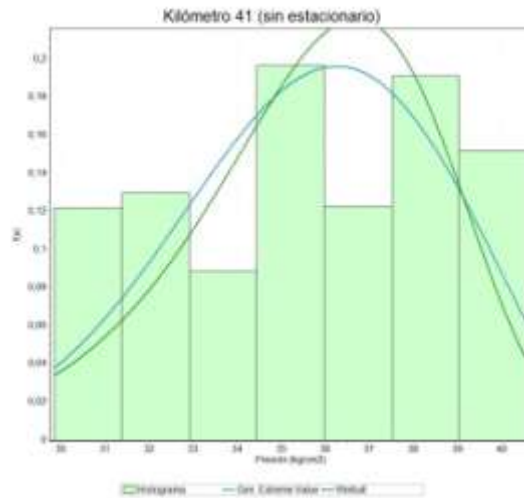
que los transitorios de presión, se generan debido a la simulación la manipulación de la primera válvula.



Gráfica 28.- Resultados de 3324 eventos en el km 33.



Gráfica 29.- Resultados de 3324 eventos en el km 36.



Gráfica 30.- Resultados de 1831 eventos en el km 41.

Al analizar los resultados de los eventos que tienen asociada una probabilidad de ocurrencia tal como se hizo para los primeros kilómetros, los eventos que generan transitorios de presión ven modificada su distribución estadística. Los resultados se muestran en la Gráfica 31, Gráfica 32 y Gráfica 33. Una vez más se ve la influencia de darle una probabilidad de ocurrencia según su credibilidad operativa a los eventos. De este

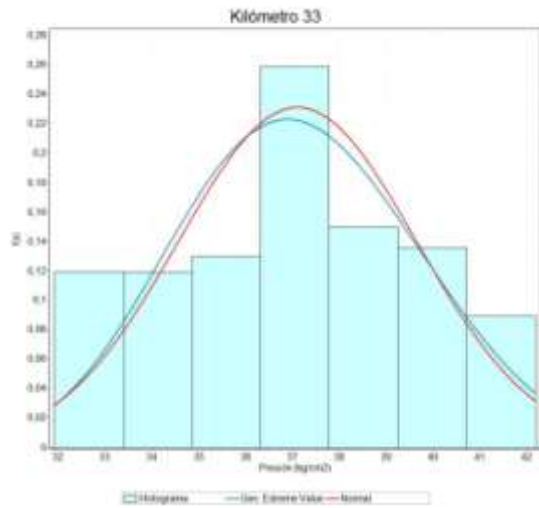
análisis se puede determinar cuáles son las presiones que aparecen con mayor frecuencia y deducir los eventos que más influyen.

Obsérvese que los histogramas asociados a los kilómetros 33 y 36 no presentan una distribución estadística similar, debido a que los eventos que generan transitorios no son los mismos y además la probabilidad asociada a los estados pone en evidencia esta característica.

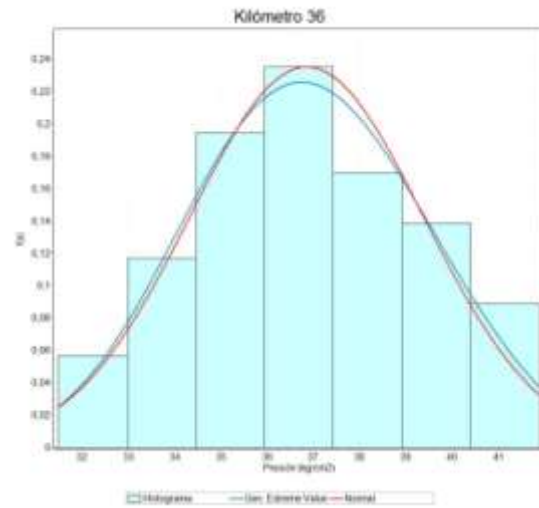
Uno de los resultados interesantes, es la asociado al kilómetro 41 ya que muestra cómo las presiones que se encuentran más a la izquierda tienen una mayor frecuencia. Sin lugar a duda, esto se debe a que los eventos a los cuales están asociadas tienen una mayor probabilidad de ocurrencia.

Ahora bien, las distribuciones que mejor se ajustan para los histogramas de presión transitoria en los kilómetros 33 y 36 es a una distribución Normal. Que el ajuste sea a una distribución Normal en el kilometraje donde se ubica la primera válvula, significa que la presiones transitorias de menor magnitud tienen la misma frecuencia que aquellos transitorios de presión más severas.

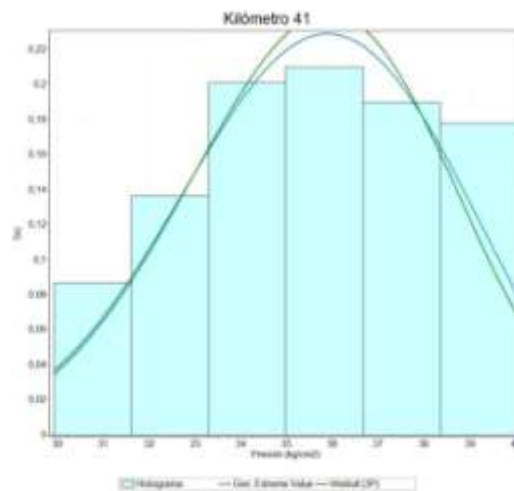
Para el kilómetro 41 el histograma se ajusta a una distribución Generalizada de Valores Extremos.



Gráfica 31.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 33.



Gráfica 32.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 36.



Gráfica 33.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 41.

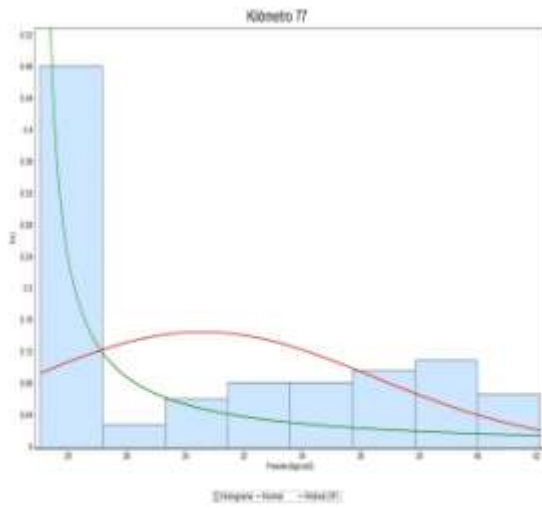
Continuando con la presentación de los resultados, ahora corresponde mostrar los resultados considerando las 4394 simulaciones en la sección de la segunda válvula. Se seleccionaron los kilómetros 77, 83 y 90. En esta ocasión se eligieron dos kilómetros que están antes de llegar a la válvula y un tercero después de ésta. Los resultados se presentan en la Gráfica 34, Gráfica 35 y Gráfica 36.

En las gráficas se puede ver que una gran cantidad de los resultados se sitúan alrededor de las presiones 25.6 kg/cm^2 , 23.9 kg/cm^2 y 22.9 kg/cm^2 . Al igual que en las dos secciones anteriores, estas presiones corresponden a las presiones estacionarias para los kilómetros 77, 83 y 90, respectivamente.

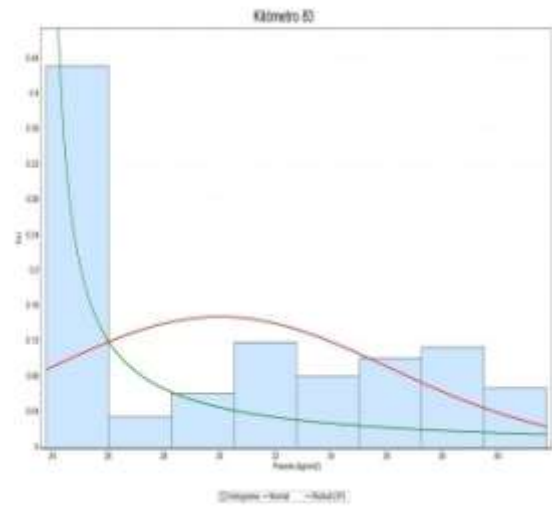
Las distribuciones a las cuales los histogramas se ajustan en el kilómetro 77 y 83 son del tipo Weibull. En el kilómetro 90, el histograma de presiones transitorias se ajusta a una distribución de tipo Gumbel. Los kilometrajes que están antes de llegar a la segunda válvula presentan el mismo tipo de distribución, la distribución cambian una vez que se hace un análisis sobre los transitorios de presión a pocos kilómetros después la segunda válvula. Esta misma característica se presentó para las distribuciones de los transitorios de presión a kilometrajes antes y después de la primera válvula.

Cuando se hace el análisis sólo sobre los transitorios de presión, se puede observar que el incremento llega a ser más de los 40 kg/cm^2 , y si los estacionarios están en promedio sobre los 24.1 kg/cm^2 , hay un incremento de casi el 65% en esta sección del ducto de los transitorios de presión con respecto a la presión estacionaria.

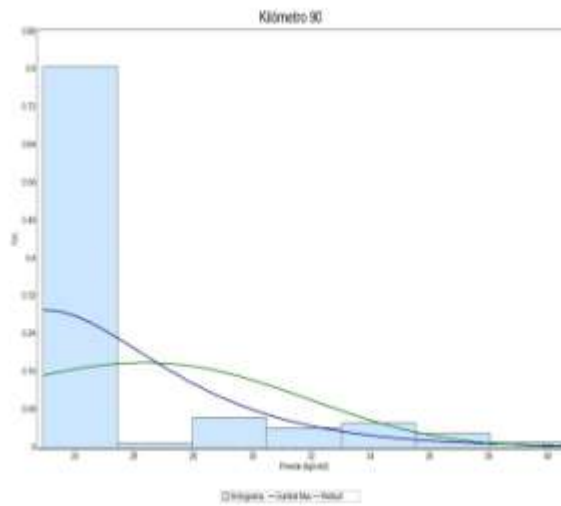
Del análisis sobre los resultados de los transitorios, se desprende, que existe una reducción de los eventos que generan los mismos. Para los kilómetros 77 y 83 la cantidad de eventos que generan transitorios está alrededor de los 2600. Para el kilómetro 90, son 920 eventos los que generan transitorios de presión. La gran cantidad de eventos que generan los transitorios de presión en esta sección, involucran a los estados donde la segunda y tercera válvulas cierran a tiempos de 180,240 y 560 segundos.



Gráfica 34.- Resultados de 4394 eventos en km 77.



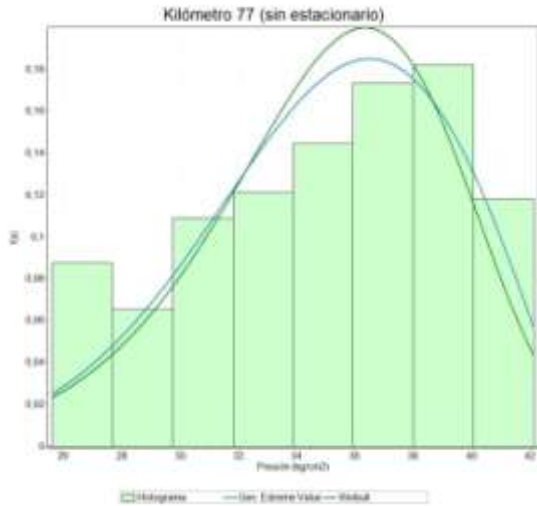
Gráfica 35.- Resultados de 4394 eventos en km 83.



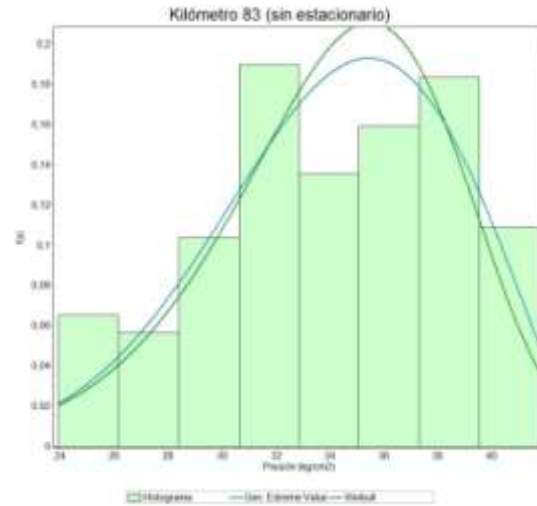
Gráfica 36.- Resultados de 4394 eventos en km 90.

De la Gráfica 37 y Gráfica 38, se puede ver como los transitorios de presión más severos, alrededor de los 41 kg/cm², tienen una frecuencia mayor para las presiones cercanas a la presión estacionaria. La Gráfica 39 para el kilómetro 90 muestra lo contrario debido a que el número de transitorios de presión más severos que se generan después de la válvula son pocos.

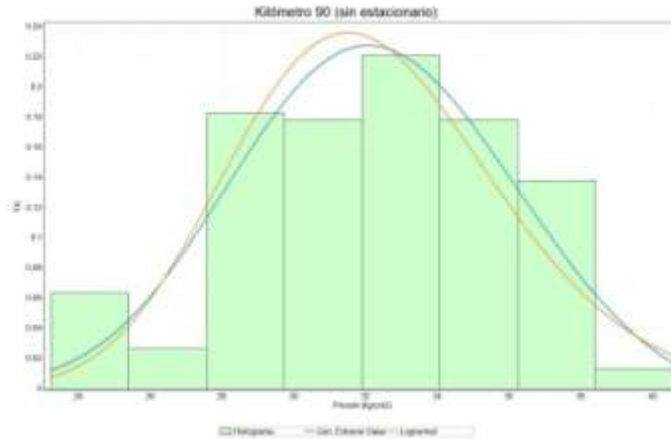
Las distribuciones que mejor se ajustan para los histogramas correspondientes a los kilómetros 77 y 83 son del tipo Generalizada de Valores Extremos y Log-Normal para el kilómetro 90.



Gráfica 37.- Resultado de 2668 eventos en el km 77.



Gráfica 38.- Resultado de 2668 eventos en el km 83

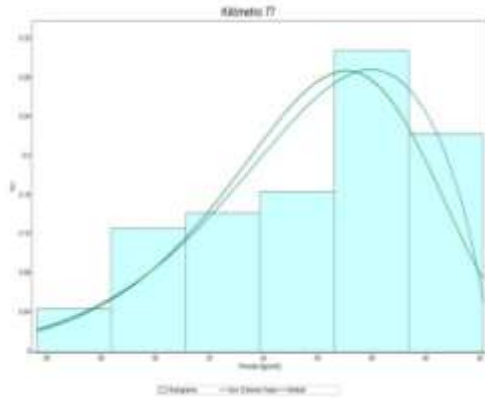


Gráfica 39.- Resultado de 920 eventos en el km 90

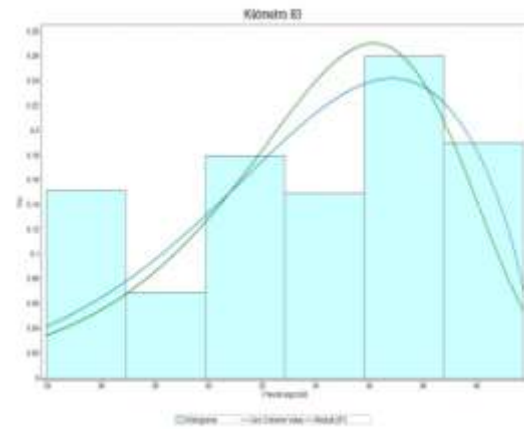
Si ahora se observan los resultados para los kilometrajes 77 y 83, pero con una probabilidad de ocurrencia para los eventos según su credibilidad operativa, se observa como los transitorios de presión más severos tienen mayor frecuencia. Esto muestra, que los eventos generan transitorios en donde se involucra el cierre de la segunda válvula con una probabilidad de ocurrencia mayor. Para el kilometro 90 los resultados de asignarle una probabilidad de ocurrencia a los eventos, muestra que la frecuencia de que ocurran

los transitorios de presión más severos es menor con respecto a los resultados de los kilómetros 77 y 83. Esto se debe a que los eventos que generan transitorios en la tercera válvula involucran el cierre de la segunda.

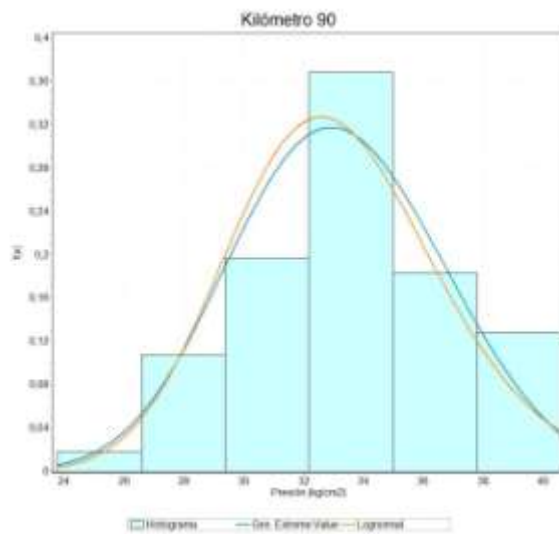
Los resultados de considerar los eventos con una probabilidad de ocurrencia no uniforme se muestran en la Gráfica 40, Gráfica 41, Gráfica 42. En las mismas se puede ver que los histogramas correspondientes a los kilómetros 77 y 83 se ajustan a una distribución Generalizada de Valores Extremos, y para el kilómetro 90 el mejor ajuste es una distribución Log-normal. Una vez más se observa que los ajustes de las distribuciones para kilometrajes cerca de la válvula son y cambian para kilómetros después de la válvula.



Gráfica 40.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 77.

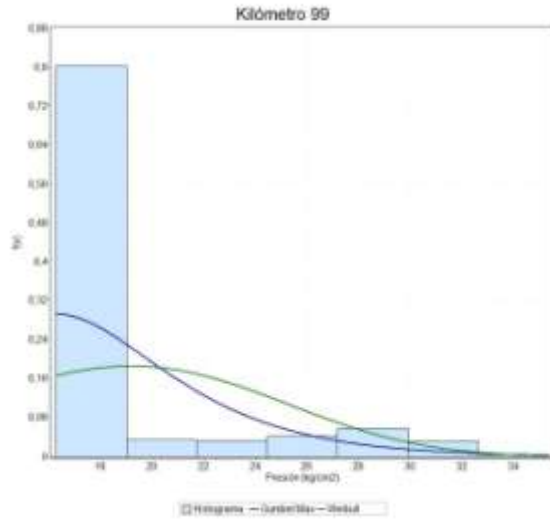


Gráfica 41.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 83.

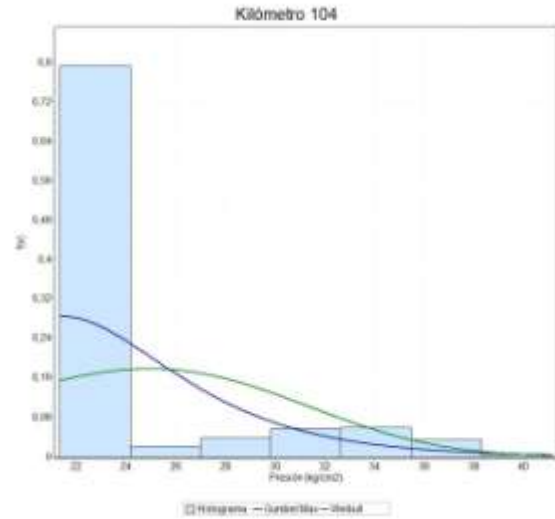


Gráfica 42.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 90.

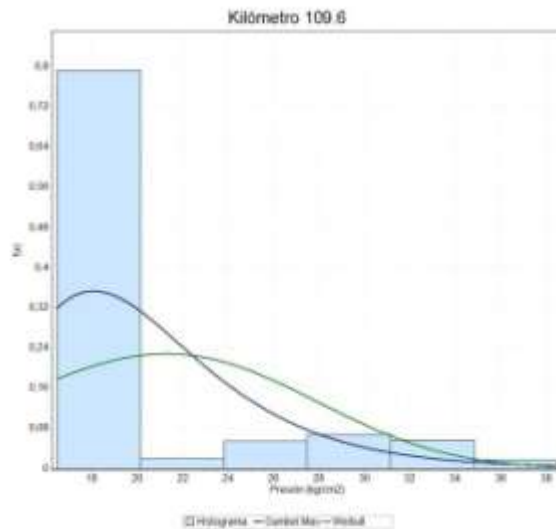
Finalmente se presentan los resultados de los kilómetros 99, 104 y 109.6 donde se encuentra la tercera válvula, los resultados se presentan en la Gráfica 43, Gráfica 44 y Gráfica 45 respectivamente. Se observa que las presiones cuya frecuencias están por encima de la presión estacionaria están alrededor de los 16.3 kg/cm², 21.33 kg/cm² y 110 kg/cm² que corresponden a las presiones estacionarias para cada uno de los kilometrajes.



Gráfica 43.- Resultados de 4394 eventos en el km 99



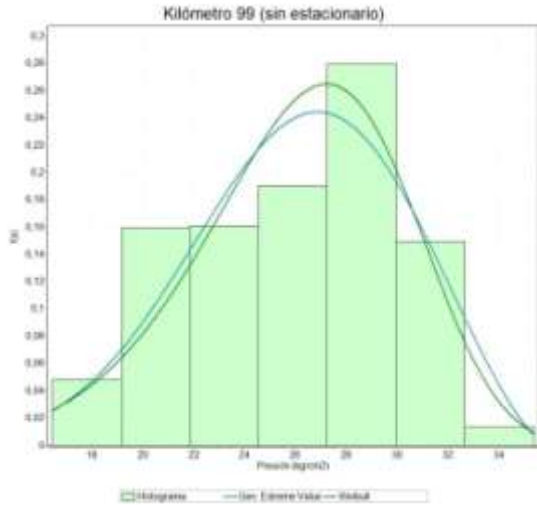
Gráfica 44.- Resultados de 4394 eventos en km el 104



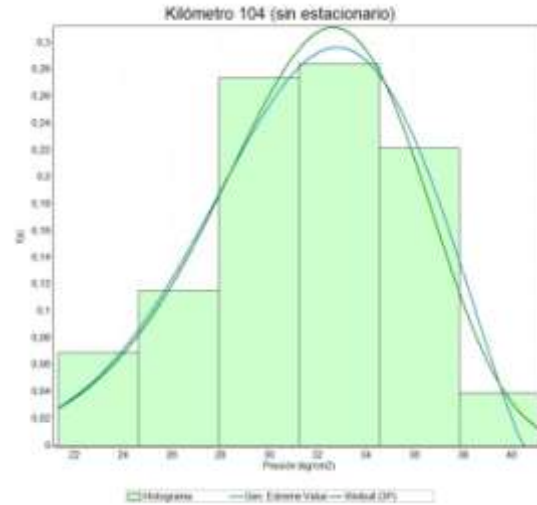
Gráfica 45.- Resultados de 4394 eventos en el km 99

Los mejores ajustes para las distribuciones son del tipo Gumbel seguida de la distribución del tipo Weibull. Al no considerar las presiones estacionarias, los resultados de la

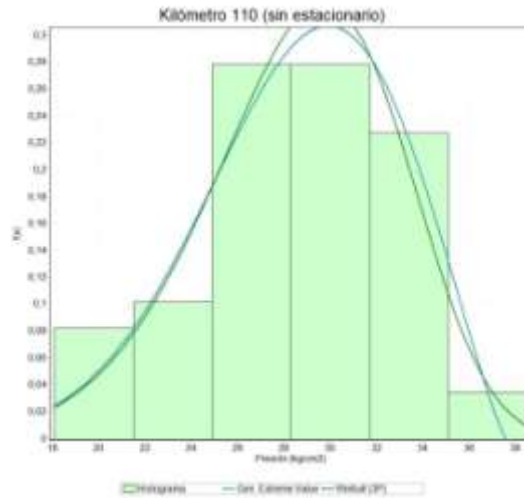
distribución de los eventos que generan transitorios de presión se muestran en las Gráfica 46, Gráfica 47 y Gráfica 48.



Gráfica 46.- Resultado de 977 eventos en el km 99.



Gráfica 47.- Resultado de 977 eventos en el km 104.



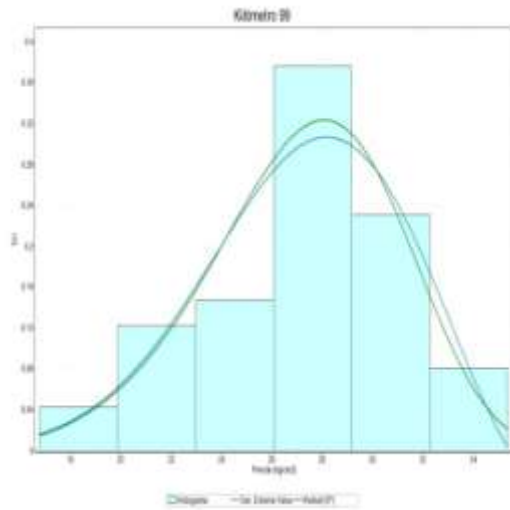
Gráfica 48.- Resultado de 990 eventos en el km 109.6.

Las graficas correspondientes a los transitorios de presión muestran que el incremento de la presión dentro del ducto llega a ser de más del 100% con respecto al estado estacionario. Los transitorios de presión, que se generan por simular la manipulación de la tercera válvula, viajan a lo largo del ducto y tienen que ver con los incrementos de presión aguas abajo a todo lo largo del ducto.

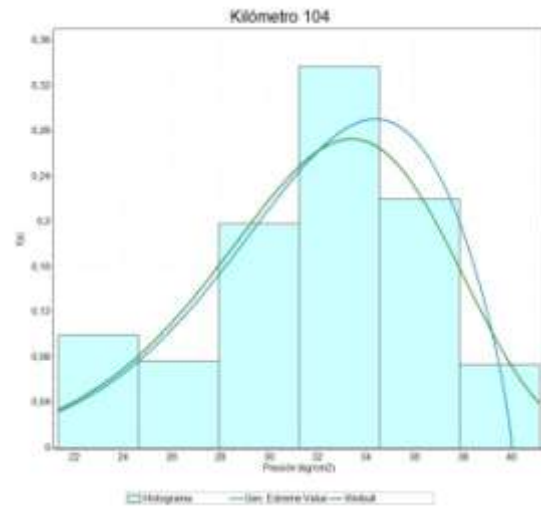
Cerca de mil eventos son los que generan transitorios de presión en esta sección del ducto. 700 de estos eventos están relacionados con el cierre de la tercera válvula a 180, 240 y 560 segundos. Sin embargo, gran cantidad de eventos donde la válvula cierra a 180 y 240 segundos generan que el transitorio de presión viaje hasta el origen del ducto.

Las distribuciones que mejor ajustan para los tres histogramas es una distribución Generalizada de Valores Extremos. Que se presente este tipo de distribución a la altura de la tercera válvula indica que los transitorios de presión originados por la manipulación del la tercera válvula, son los transitorios de presión más severos, con incrementos de presión muy importantes.

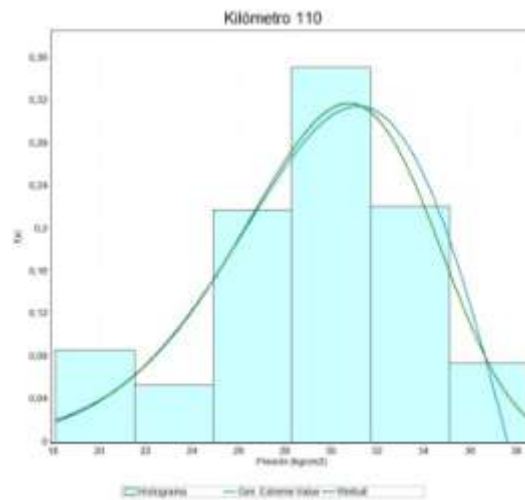
Al considerar que los eventos tienen una probabilidad de ocurrencia diferente según su credibilidad, la distribución estadística para estos transitorios de presión se presentan en la Gráfica 49, Gráfica 50 y Gráfica 51. Se puede observar de las gráficas como los transitorios de presión más severos tienen una frecuencia de ocurrencia muy parecida a las presiones que se generan muy cerca del estado estacionario. La distribución estadística para estas tres secciones del ducto es prácticamente la misma. Los tres histogramas, tienen una tienen el mejor ajuste a una distribución del tipo Weibull, en el segundo mejor ajuste ocurre para una distribución Generalizada de Valores Extremos.



Gráfica 49.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 99.



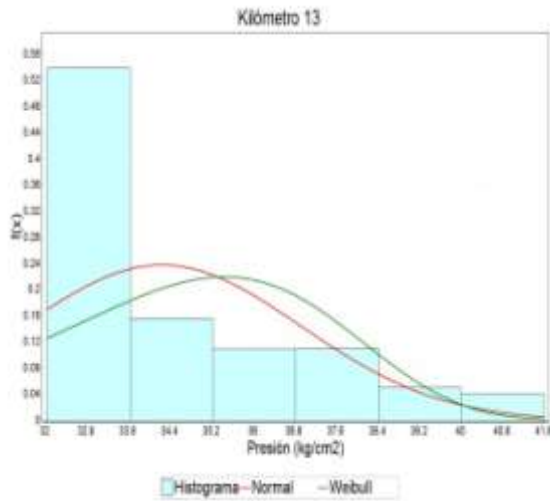
Gráfica 50.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 104.



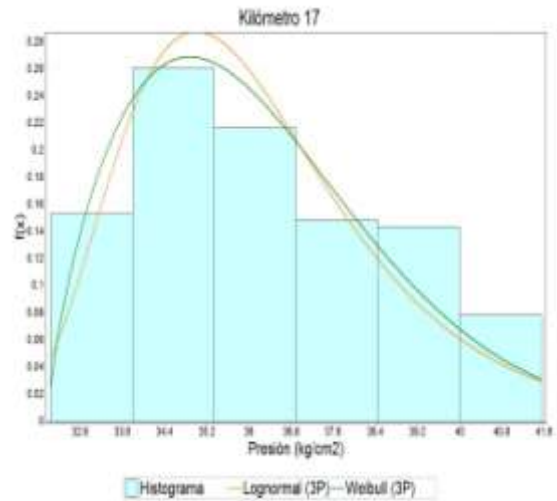
Gráfica 51.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 109.6

Es necesario comentar que hasta el momento sólo se han presentado resultados de 12 resultados de las 23 secciones que se eligieron para el análisis. Para los resultados de las once secciones restantes también se considera a los eventos que generan transitorios de presión según su probabilidad de ocurrencia.

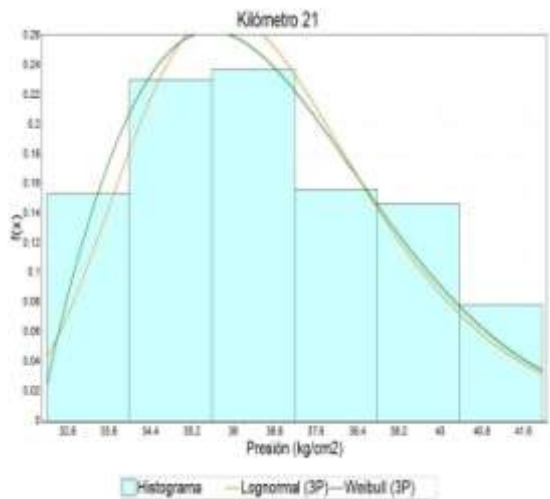
Las once secciones se inician en los kilómetros 13, 17, 21, 25, 47, 53, 59, 69, 71 y 94. Los resultados se presentan de la Gráfica 52 a la Gráfica 61 para cada uno de los kilometrajes.



Gráfica 52.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 13.



Gráfica 53.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 17.

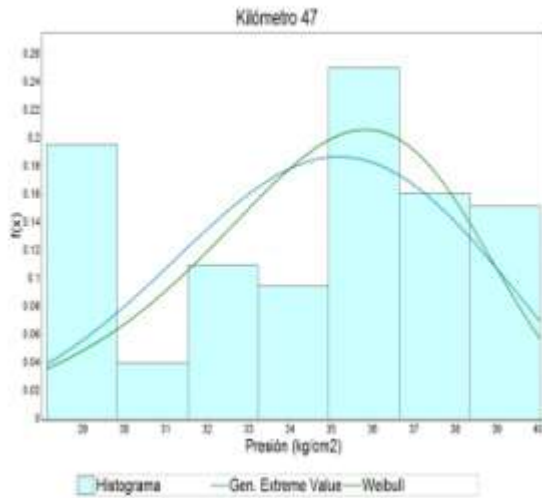


Gráfica 54.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 21.

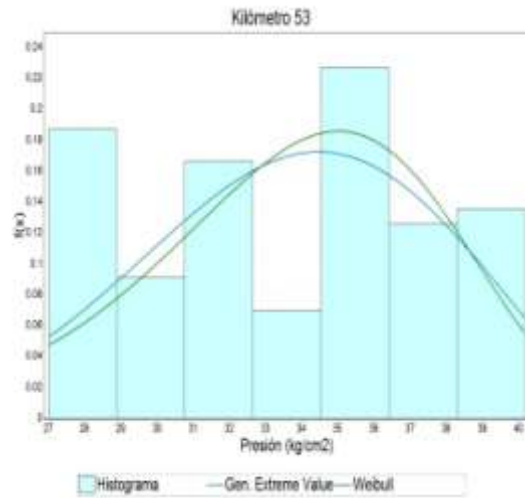


Gráfica 55.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 25.

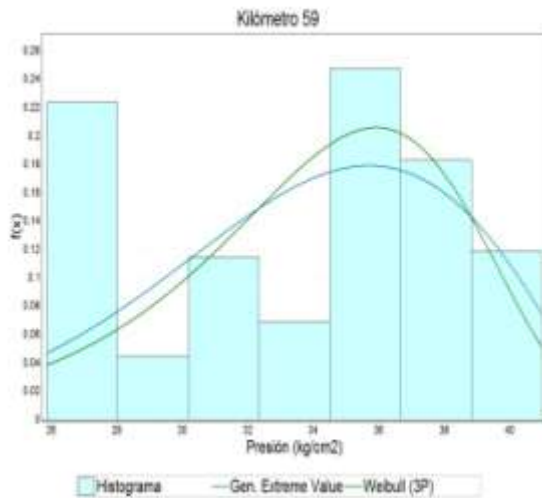
Los resultados de los once secciones, complemento de las 23 elegidas para la presentación del análisis en esta tesis, tienen similitud con los primeros doce kilómetros que se analizaron previamente. Los kilómetros antes de la primera válvula (km 36) muestran cómo va evolucionando las distribuciones estadísticas con respecto a la posición en el ducto empezando por una distribución Exponencial hasta terminar en una distribución Normal pasando por las distribución de tipo Weibull y Log-normal.



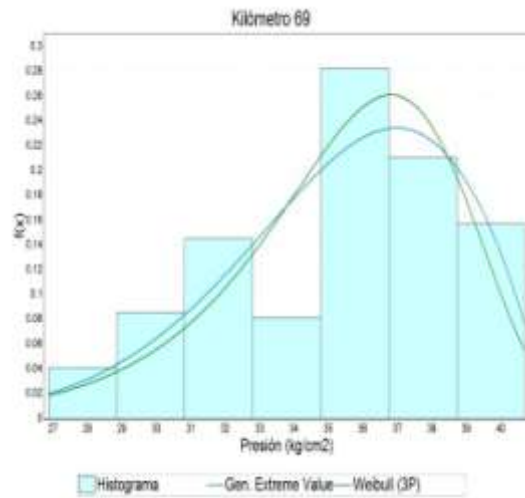
Gráfica 56.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 47.



Gráfica 57.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 53.

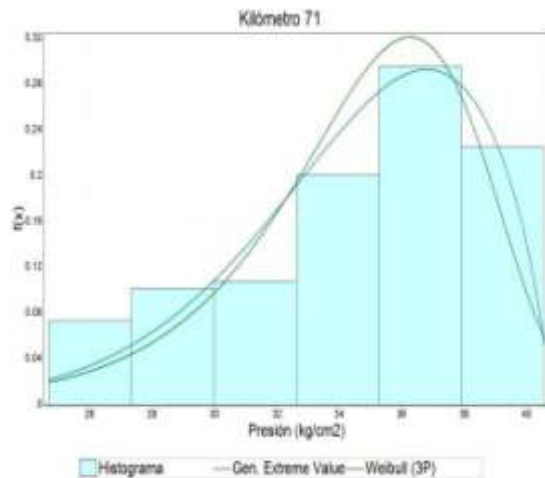


Gráfica 58.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 59.

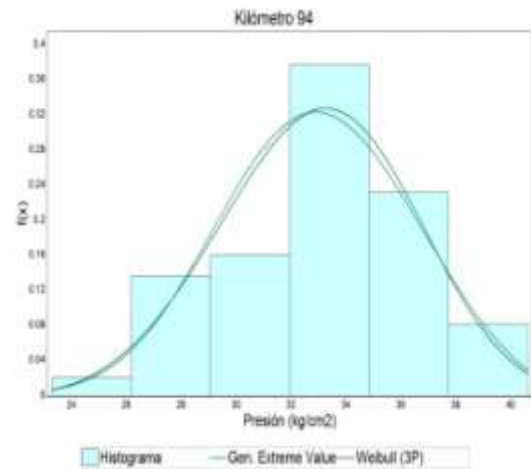


Gráfica 59.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 69.

Para los kilómetros previos a la segunda válvula ubicada en el kilómetro 86, los resultados muestran que a la altura de los kilometrajes 50 y 60, los transitorios de presión con mayor frecuencia están muy cerca a las presiones estacionarias. Las distribuciones que se observan para la sección que comprende desde la primera válvula a la segunda van de una distribución Generalizada de Valores Extremos a una distribución de tipo Weibull.

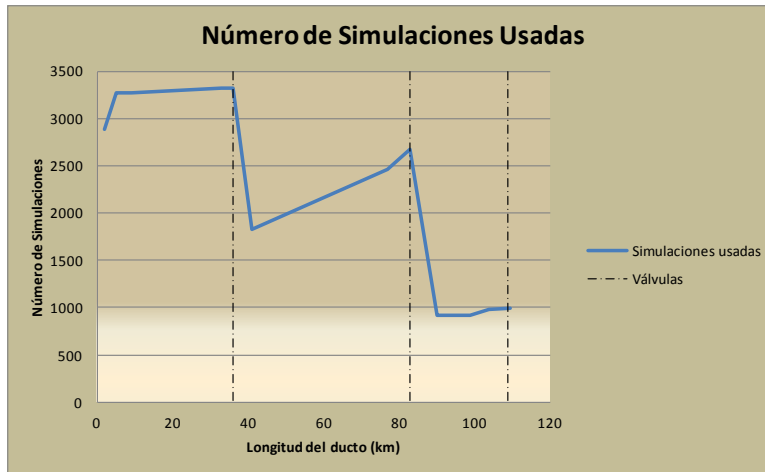


Gráfica 60.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 71.



Gráfica 61.- Resultado de los transitorios de presión con probabilidad para el km 94.

Para la sección final del ducto, que comprende la sección de la segunda válvula a la tercera válvula, la distribución estadística de los transitorios de presión tienen una distribución Generalizada de Valores Extremos.



Gráfica 62.- Número de simulaciones para transitorios que generan presiones superiores a la estacionarias.

La Gráfica 62 muestra el número de los transitorios de presión que generan presiones superiores a la presión estacionaria y su comportamiento conforme la posición del análisis se va acercando a cada válvula. Nótese como se incrementa el número de presiones transitorios de presión se acerca a cada una de las válvulas. Sin embargo, las presiones van disminuyendo en frecuencia conforme se acerca al final del ducto.

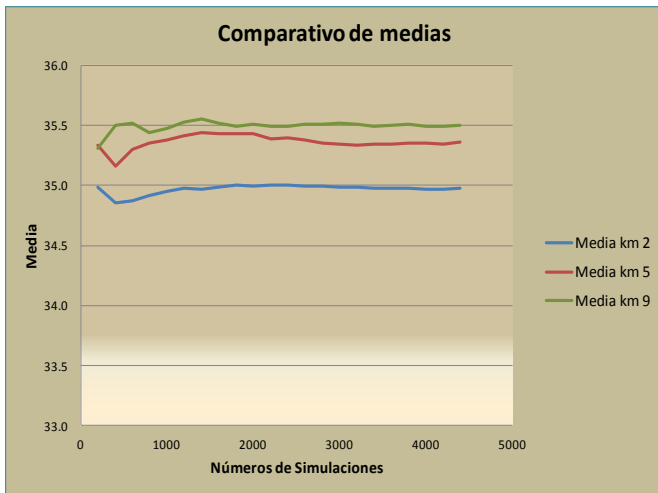
Si bien es cierto el número de transitorios de presión al final del ducto es menor, cerca del 80% de los eventos que generan los transitorios de presión en esta sección son de mayor magnitud y se reflejan a lo largo del ducto, interfiriendo en los transitorios que se generan aguas abajo en dirección al origen del ducto.

Una vez que se han mostrado como se distribuyen estadísticamente los datos se hace un resumen de los resultados más importantes.

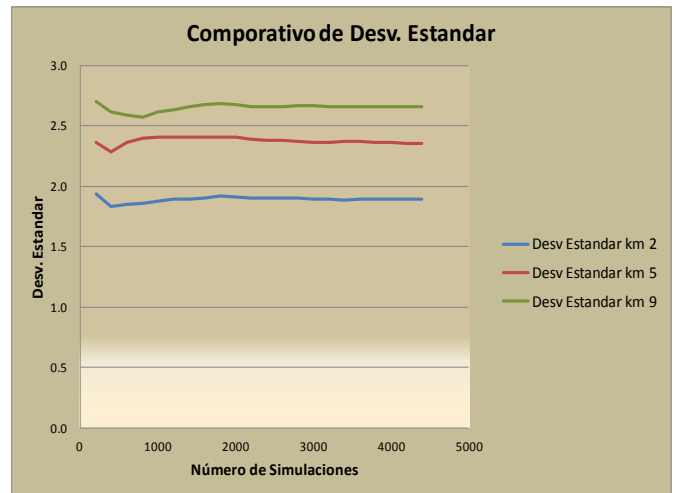
1. Los transitorios de presión tienen una distribución estadística Log-normal en los kilómetros iniciales. Conforme los transitorios de presión que aproximan a la primera válvula tienen una distribución estadística Normal. Muy cerca de la segunda válvula, los transitorios de presión tienen una distribución Generalizada de Valores Extremos. Y al final del ducto los transitorios se presentan con una distribución Weibull.

2. Los transitorios de presión que se presentan al inicio del ducto, se generan cuando la bomba pasa de estar trabajando estar apagada.
3. El número de transitorios de presión aumentan conforme se van acercando a las válvulas y van disminuyendo conforme van llegando al final del ducto.
4. Cerca del 80% de los transitorios de presión que se generan al final del ducto interfieren directamente con los incrementos de presión aguas abajo.
5. Los estados que tienen mayor influencia en la generación de transitorios de presión, son los relacionados con el cierre de la válvula a tiempos de 180, 270 y 560 segundos con la bomba encendida.
6. El estado bomba encendida a apagada en combinación con el estado donde la primera válvula cierra a tiempos cortos, genera los mayores incrementos de presión al inicio del ducto.

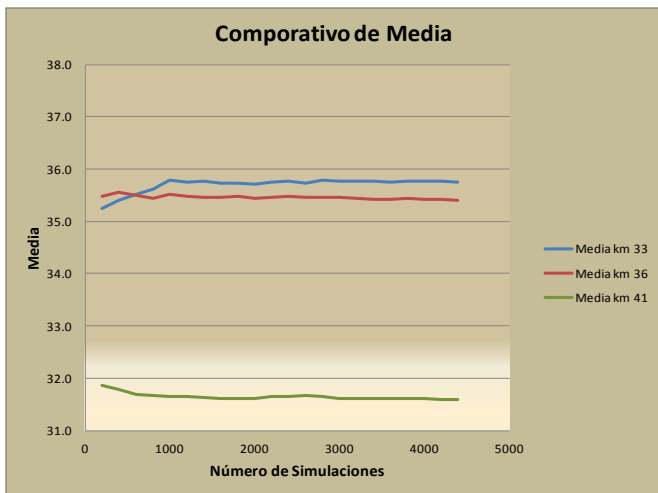
En el Anexo I Tabla C. se muestra el total de simulaciones con un orden específico. Es necesario comentar que las simulaciones se realizaron de manera aleatoria. La finalidad de realizar las simulaciones de forma aleatoria es para saber en qué momento las medias de las simulaciones tienen un comportamiento constante. El comportamiento constante de las medias determina el número de simulaciones que son necesarias para alcanzar un nivel de exactitud razonablemente bueno, sin la necesidad de llegar a realizar todas las simulaciones.



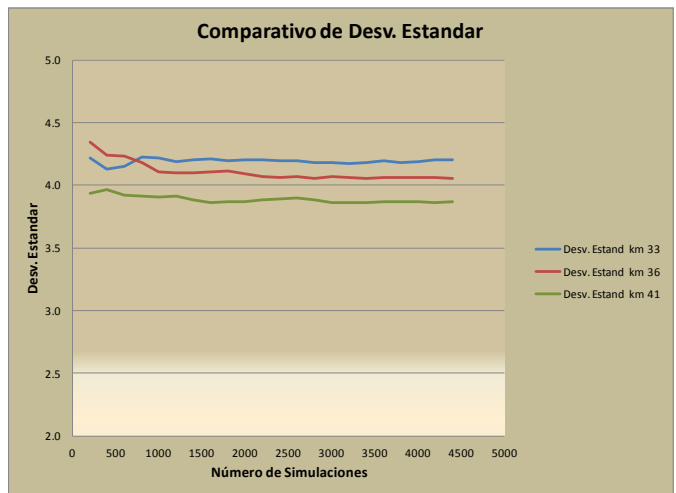
A



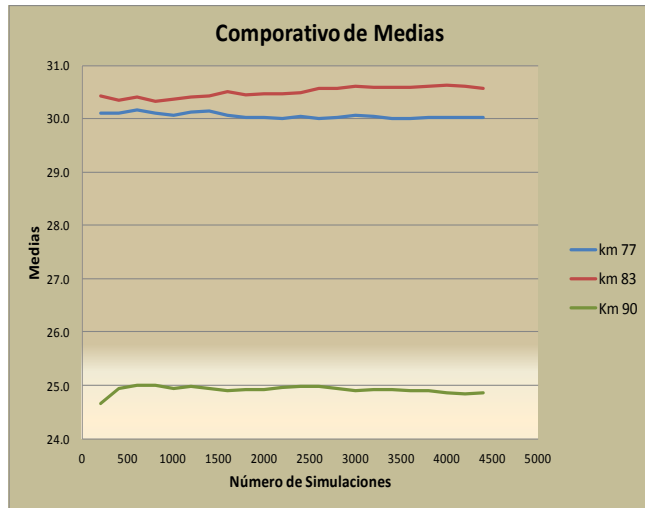
A1



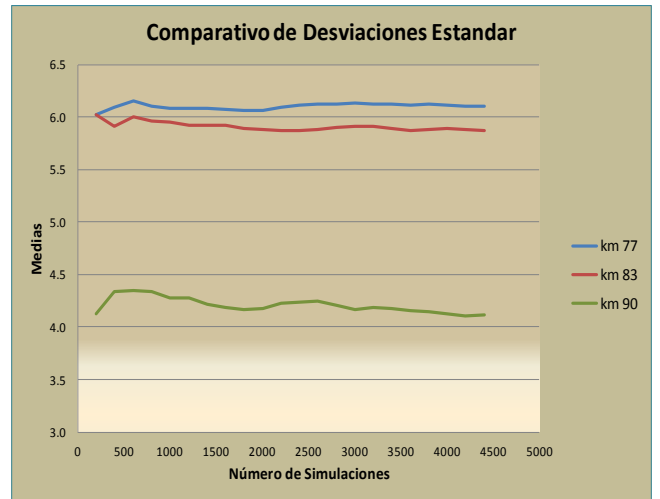
B



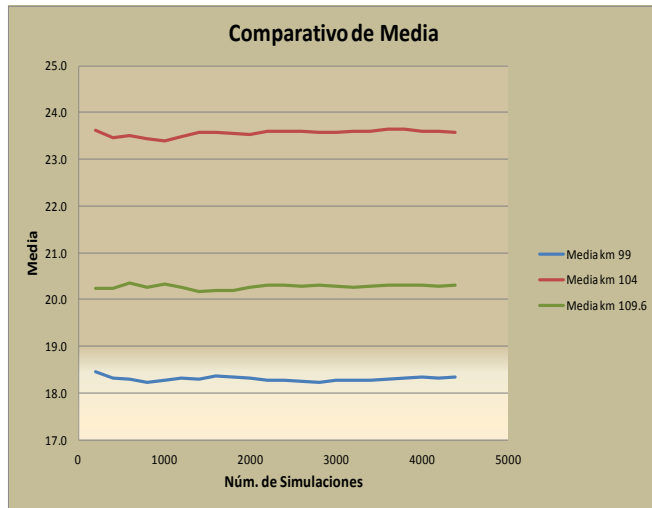
B1



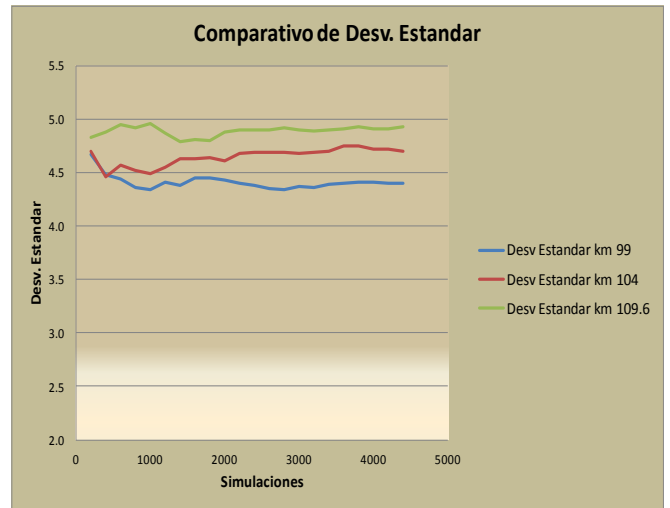
C



C1



D



D1

Gráfica 63.- Comportamiento de la media y Desviación Estándar para las 4,394 simulaciones

De la Gráfica 63, centrandose atención en las gráficas A, B, C y D se puede observar que las medias se estabilizan entre las 1,500 y 2,000 simulaciones.

Las desviaciones estándar muestran que tan dispersos se encuentran los datos con respecto a las respectivas medias. Se puede ver de la Gráfica 63 casos A1, B1, C1 y D1, que los datos que están menos dispersos son los que se ubican en el kilómetro 2. Los datos ubicados en el kilómetro 77 muestran una mayor dispersión.

4.4 Distribución para los defectos de corrosión

La inspección con equipo instrumentado es la herramienta más usada para obtener información sobre la condición del deterioro del ducto. En la sección 3.4, particularmente en la Tabla 7, se describen las indicaciones detectadas y dimensionadas a través de la inspección con equipo instrumentado del ducto que se analiza, para el año 2000. En la Sección 3.4 se decidió hacer el análisis sobre las pérdidas de metal externa debidas a corrosión. Por esta razón, este análisis sólo contiene información sobre estas pérdidas de metal y las distribuciones estadísticas de las dimensiones de las mismas.

En la Sección 3.4 se eligió al modelo PCORRC como el modelo para calcular la presión de fallas de las indicaciones de pérdida de metal externa. Recordando la información presentada en la Sección 2.4.1, las variables necesarias para determinar la presión de falla son:

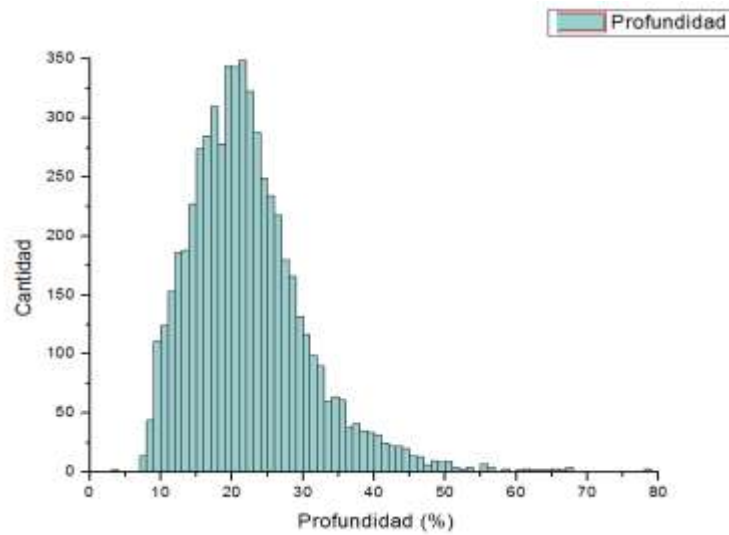
σ_{UTS}	Esfuerzo Ultimo a la Tensión
t	Espesor de la pared del ducto
D	Diámetro externo del ducto
d	Profundidad del defecto
L	Longitud del defecto

Tabla 15.- Variables para el modelo de falla PCORRC

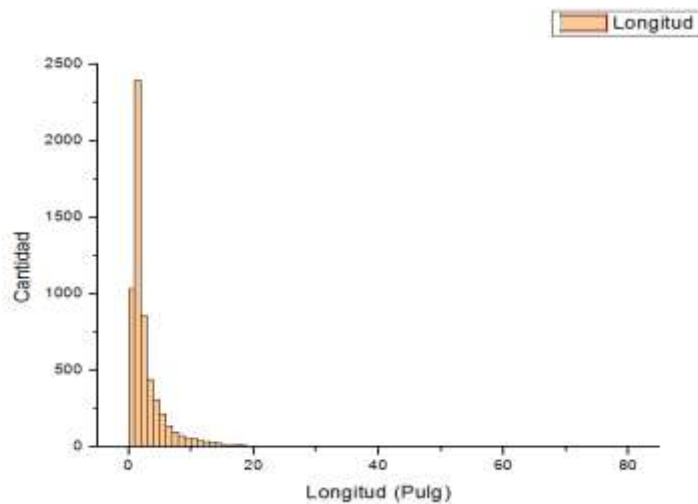
De las variables que se presentan en la Tabla 15, la profundidad (d) y longitud (L) de los defectos de corrosión detectados en el ducto tienen una distribución estadística como se muestran en las Gráfica 64 y Gráfica 65, respectivamente. Las variables restantes se obtienen de la Tabla 3 de la Sección 3.1, Estas variables tienen asociada una distribución estadística debido a la incertidumbre que presentan según se refiere en la Tabla 1 del Capítulo 1 . A continuación se muestra la Tabla 16, la cual contiene la información sobre las variables restantes.

	Diámetro (D) (pulg.)	Espesor (t) (pulg.)	Esfuerzo UTS (ksi)
Valor	36	0.469	74.984
Tipo de Distribución	Normal	Normal	Normal
Covarianza	0.06%	1.00%	3.5%

Tabla 16.- Valor para las variables Dimensiones del ducto



Gráfica 64.- Distribución estadística de la profundidad de defectos de corrosión en el ducto; en por ciento de espesor de pared



Gráfica 65.- Distribución estadística de la longitud de los defectos de corrosión del ducto

De la distribución estadística de profundidades se puede observar que la mayoría de las profundidades se presenta entre el 10% y el 40% del espesor de pared del ducto. Sin embargo, hay profundidades cerca al 80% de dicho espesor.

La distribución estadística de las longitudes muestra que la gran mayoría de los defectos de corrosión externa se encuentran dentro del rango de 0 a 15 pulgadas, pero existen longitudes del orden de 80.4 pulgadas (2,044 mm).

Para el análisis de confiabilidad se tomaron en cuenta los defectos de corrosión que se detectaron en cada una de las 23 secciones utilizadas para el análisis de los transitorios de presión. Para el cálculo de la probabilidad de cada defecto se tomaron en cuenta las incertidumbres de cada variable involucrada en el cálculo de la presión de falla. Se utilizó el algoritmo de Monte Carlo, como el que se muestra en la Fig. 11. En cada una de las 30,000 simulaciones utilizadas para estimar la probabilidad de falla de cada defecto se seleccionaron de forma aleatoria que se alimentan al modelo PCORRC. La distribución de las presiones de operación que generan los transitorios de presión se utilizó como distribución de la carga en el ducto. En cada simulación, el valor de presión de falla estimada se comparó con un valor de presión de operación transitorio en la sección. al final de las simulaciones, el número de casos donde la presión de falla resultó igual o menor a la presión de operación se dividió por el número total de simulaciones para obtener un estimado no sesgado de la probabilidad de falla del defecto analizado.

4.5 Estimación de la Confiabilidad

Para ilustrar la metodología que en este trabajo se propone, se estimó la confiabilidad estructural del oleoducto de estudio usando la aproximación de carga-resistencia. Para las variables de carga en cada una de las 23 secciones de interés en el ducto, se utilizaron las distribuciones estadísticas de los transitorios de presión en cada sección. Como resistencia se utilizó la presión de falla estimada por PCORRC para cada defecto en cada sección.

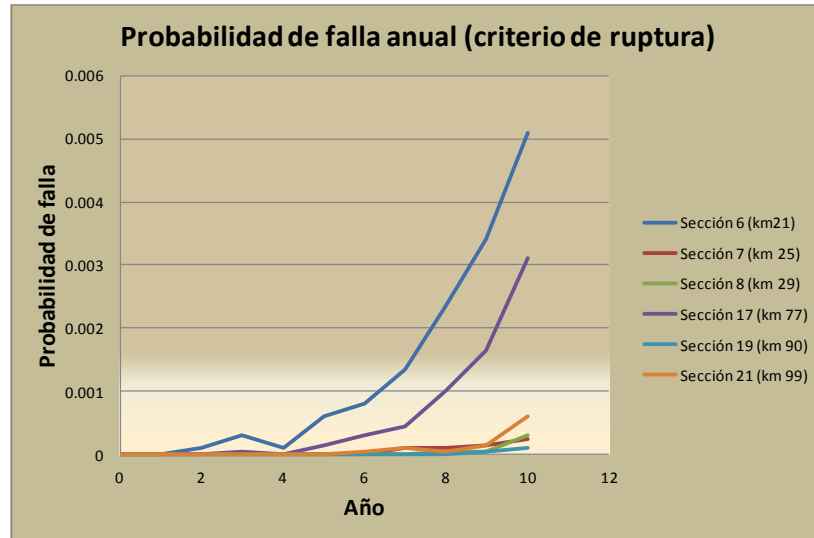
Una vez que se identificó como se distribuyen estadísticamente los transitorios de presión y el tipo de distribuciones estadísticas de las variables, necesarias para la evaluación de la presión de falla, se estimó la probabilidad de falla para cada defecto que detectó el equipo instrumentado usando el método de simulación de Monte Carlo. Una vez que se estimó la probabilidad de falla para cada uno de los defectos, se estimó la probabilidad de falla de cada una de las secciones. Posteriormente se estimó la probabilidad de falla anual de cada sección. Con la probabilidad de falla anual de cada sección se estimó su índice de falla anual. Los resultados de estimar la probabilidad de falla anual para las secciones, bajo el criterio de ruptura se muestran en la Tabla 17.

PROBABILIDAD DE FALLA (CRITERIO DE RUPTURA)

Periodo de tiempo	Sección 6 km 17 al km 21	Sección 7 km 21 al km 25	Sección 8 km 25 al km 29	Sección 17 km 71 al km 77	Sección 19 km 83 al km 90	Sección 21 km 94 al km 99
Año 0	0	0	0	0	0	0
Año 1	0	0	0	0	0	0
Año 2	1.00E-04	0	0	0	0	0
Año 3	3.00E-04	0	0	5.00E-05	0	0
Año 4	1.00E-04	0	0	0	0	0
Año 5	6.00E-04	0	0	1.50E-04	0	0
Año 6	8.00E-04	0	0	3.00E-04	0	5.00E-05
Año 7	1.35E-03	1.00E-04	0	4.50E-04	0	1.00E-04
Año 8	2.35E-03	1.00E-04	5.00E-05	1.00E-03	0	5.00E-05
Año 9	3.40E-03	1.50E-04	5.00E-05	1.65E-03	5.00E-05	1.50E-04
Año 10	5.10E-03	2.50E-04	3.00E-04	3.10E-03	1.00E-04	6.00E-04

Tabla 17.- Evolución de la probabilidad de falla anual para el criterio de ruptura.

La estimación de la probabilidad de falla anual por sección bajo el criterio de ruptura y su evolución anual durante 10 años se muestran en la Gráfica 66



Gráfica 66.- Estimación de la probabilidad de falla anual por sección, para el criterio de ruptura.

La estimación de la probabilidad de falla anual para cada sección para el criterio de ruptura y su evolución anual durante un periodo de 10 años a partir de la fecha de inspección, muestra a la sección 6 del oleoducto con una probabilidad de falla al final del segundo a partir de la inspección estimada de $1 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{año}}$. Conforme la indicación evoluciona en el tiempo, la probabilidad de falla anual del año al final del año 10 se estima en un valor de $5 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{año}}$.

La estimación de la probabilidad de falla anual para cada sección para el criterio de ruptura, mostró que en la sección 17 kilómetro 71 al 77, la probabilidad de falla anual al final del año 3 se estimó en $5 \times 10^{-5} \frac{1}{\text{año}}$. Para esta misma sección, la probabilidad de falla anual al final del año 10 se estimó en $3.1 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{año}}$. La probabilidad de falla anual bajo el criterio de ruptura también se estimó en las secciones 7, 8, 19 y 21, en las cuales la probabilidad de falla anual, al final del año 10 se estimaron del orden de 2.5×10^{-4} , 3×10^{-4} , 1.0×10^{-4} y $6 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{año}}$, respectivamente.

La estimación de la probabilidad de falla anual bajo el criterio de ruptura muestra las secciones del ducto que deben de ser consideradas para su mantenimiento. Nótese que la probabilidad de falla anual en las secciones que se muestran en la Tabla 17, al final del año 10 a partir de la fecha de inspección, están por encima del valor permisible máximo que comúnmente se considera para el riesgo en este tipo de ductos (7) (12).

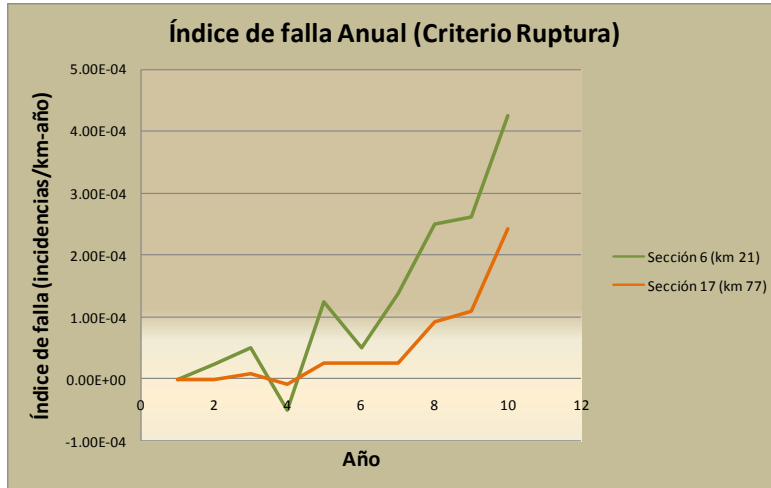
Como se mencionó en el Capítulo 3, la industria petrolera usa el índice de falla como una "medida" de la probabilidad de falla. Por esta razón se estimó el índice de falla anual usando la probabilidad de falla anual para cada sección (Tabla 17) y la ecuación 36 del Capítulo 3. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

INDICE DE FALLA ANUAL CRITERIO RUPTURA(incidentes/km-año)

Periodo de tiempo	Sección 6 km 17 al km 21	Sección 7 km 21 al km 25	Sección 8 km 25 al km 29	Sección 17 km 71 al km 77	Sección 19 km 83 al km 90	Sección 21 km 94 al km 99
Año 1	0	0	0	0	0	0
Año 2	2.50E-05	0	0	0	0	0
Año 3	5.00E-05	0	0	8.33E-06	0	0
Año 4	-5.00E-05	0	0	-8.33E-06	0	0
Año 5	1.25E-04	0	0	2.50E-05	0	0
Año 6	5.00E-05	0	0	2.50E-05	0	1.00E-05
Año 7	1.38E-04	2.50E-05	0	2.50E-05	0	1.00E-05
Año 8	2.50E-04	0	1.25E-05	9.17E-05	0	-1.00E-05
Año 9	2.63E-04	1.25E-05	0	1.08E-04	9.09E-06	2.00E-05
Año 10	4.25E-04	2.50E-05	6.25E-05	2.42E-04	9.09E-06	9.00E-05

Tabla 18.- Índice de falla anual para el criterio de ruptura para las indicaciones presentes en el oleoducto de estudio.

Los resultados del índice de falla anual para cada sección que se presentan en la Tabla 18, muestran que al final del año 10 a partir de la fecha de inspección, el número de incidentes por km-año para la sección 6 es de $4.25 \times 10^{-4} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$. Para la sección 17 es de $2.42 \times 10^{-4} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$. Estos valores, al igual que la probabilidad de falla anual, están por encima de los valores de confiabilidad mínimo tolerable para este tipo de ductos en zonas altamente pobladas (7) (12).



Gráfica 67.- Índices de falla anual más severas (criterio de ruptura).

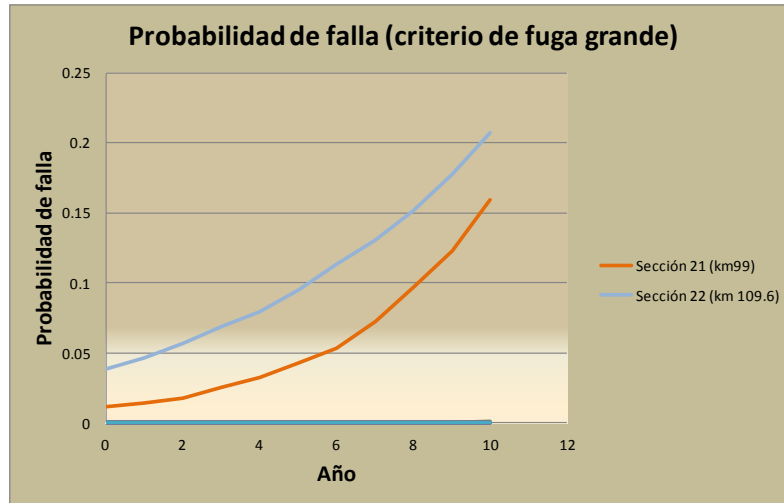
Los resultados para la probabilidad de falla anual para las secciones del ducto, considerando el criterio de fuga grande y su evolución en un periodo de 10 años a partir de la fecha de inspección se muestran en la Tabla 19. Se puede observar que para la sección 21, la probabilidad de falla anual bajo el criterio de fuga grande, presenta una probabilidad de falla en el primer año de $1.1 \times 10^{-2} \frac{1}{\text{año}}$ y para el año 10 desde el momento de la inspección, la probabilidad de falla se estimó en $1.5 \times 10^{-1} \frac{1}{\text{año}}$.

PROBABILIDAD DE FALLA (CRITERIO DE FUGA GRANDE)

Periodo de tiempo	Sección 3 km 5 al km 9	Sección 4 km 9 al km 13	Sección 6 km 17 al km 21	Sección 8 km 25 al km 29	Sección 18 km 77 al km 83	Sección 21 km 94 al km 99	Sección 22 km 99 al km 104	Sección 23 km 104 al km 109.6
Año 0	0	0	0	0	0	1.15E-02	0	3.86E-02
Año 1	0	0	0	0	0	1.42E-02	0	4.63E-02
Año 2	0	0	0	0	0	1.81E-02	0	5.66E-02
Año 3	0	0	0	0	0	2.54E-02	0	6.86E-02
Año 4	0	0	0	0	0	3.22E-02	0	7.95E-02
Año 5	0	0	0	0	0	4.32E-02	0	9.53E-02
Año 6	0	0	0	0	0	5.34E-02	0	1.13E-01
Año 7	1.00E-04	0	0	0	0	7.24E-02	0	1.30E-01
Año 8	5.00E-05	2.00E-04	2.00E-04	0	5.00E-05	9.67E-02	1.00E-04	1.51E-01
Año 9	1.50E-04	3.50E-04	2.50E-04	5.00E-05	1.00E-04	1.22E-01	2.00E-04	1.77E-01
Año 10	2.50E-04	7.50E-04	5.50E-04	3.00E-04	2.50E-04	1.60E-01	3.50E-04	2.07E-01

Tabla 19.- Evolución de la probabilidad de falla para el criterio de fuga grande

En la Gráfica 68 se presenta la evolución de la probabilidad de falla anual, mostrando las probabilidades de falla anuales más significativas.



Gráfica 68.- Estimación de la probabilidad de falla bajo el criterio de fuga grande

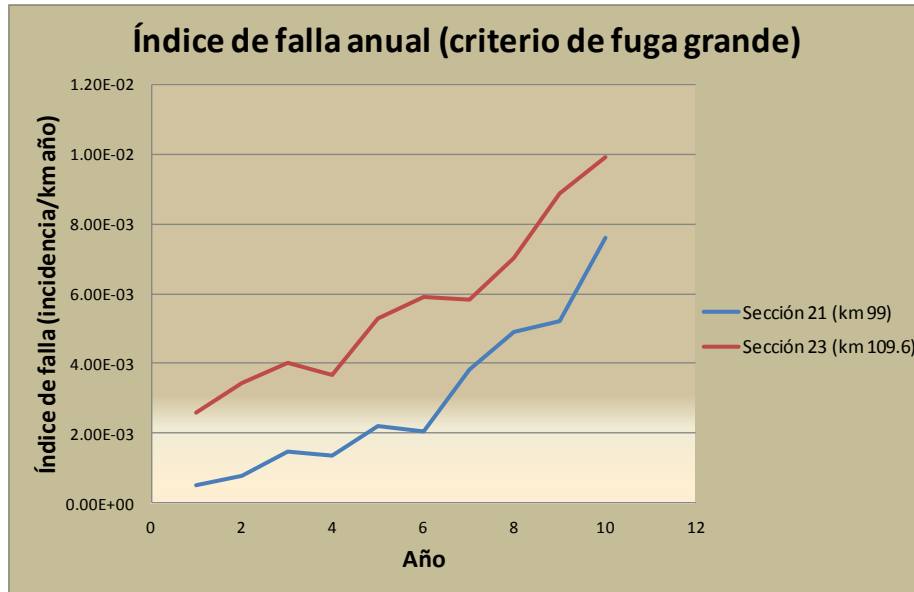
Ya se comentó que es necesario estimar el índice de falla anual para cada una de las secciones para que el operador del ducto pueda establecer programas de mantenimiento. Para estimar el índice de falla se usaron los resultados de la Tabla 19 y la ecuación (36). Los resultados se muestran en la Tabla 20.

INDICE DE FALLA ANUAL CRITERIO FUGA GRANDE (incidentes/km-año)

Periodo de tiempo	Sección 3 km 5 al km 9	Sección 4 km 9 al km 13	Sección 6 km 17 al km 21	Sección 8 km 25 al km 29	Sección 18 km 77 al km 83	Sección 21 km 94 al km 99	Sección 22 km 99 al km 104	Sección 23 km 104 al km 109.6
Año 1	0	0	0	0	0	5.30E-04	0	2.6E-3
Año 2	0	0	0	0	0	7.77E-04	0	3.4E-3
Año 3	0	0	0	0	0	1.5E-3	0	4.0E-3
Año 4	0	0	0	0	0	1.4E-3	0	3.7E-3
Año 5	0	0	0	0	0	2.2E-3	0	5.3E-3
Año 6	0	0	0	0	0	2.0E-3	0	5.9E-3
Año 7	2.50E-5	0	0	0	0	3.8E-3	0	5.8E-3
Año 8	-1.25E-5	5.0E-5	5.00E-5	0	7.7E-6	4.9E-3	1.82E-05	7.0E-3
Año 9	2.50E-5	3.7E-5	1.25E-5	1.25E-5	7.7E-6	5.2E-3	1.82E-05	8.9E-3
Año 10	2.50E-5	1.0E-5	7.50E-5	6.25E-5	2.3E-5	7.6E-3	2.73E-05	9.9E-3

Tabla 20.- Índice de falla para la probabilidad de falla para el criterio de fuga grande.

La Gráfica 69 muestra de forma gráfica el índice de falla para las secciones que presentaron una mayor índice de fallas, considerando el criterio de fuga grande.



Gráfica 69.- Índice de falla más severas (criterio de fuga grande)

Los índices de fallas anuales para las secciones 21 y 23 al final del año 10 fueron de $7.6 \times 10^{-3} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$ y de $9.9 \times 10^{-3} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$ respectivamente. Los valores para el índice de falla anual para las secciones 21 y 23 están por arriba de los valores máximos que se estiman usando la confiabilidad solo tomando la presión estacionaria.

Por último se estima la probabilidad de falla anual para cada una de 23 secciones del ducto, considerando el criterio de fuga pequeña y su evolución anual en un periodo de tiempo de 10 años, los resultados para las secciones más críticas se muestran en la Tabla 21.

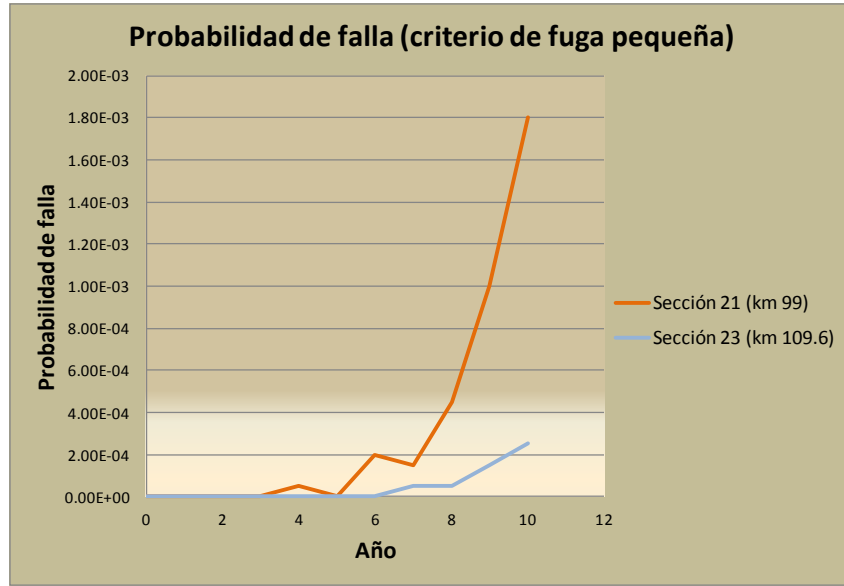
PROBABILIDAD DE FALLA (CRITERIO DE FUGA PEQUEÑA)

Periodo de tiempo	Sección 21 km 94 al km 99	Sección 23 km 104 al km 109.6
Año 0	0	0
Año 1	0	0
Año 2	0	0
Año 3	0	0
Año 4	5.00E-05	0
Año 5	0	0
Año 6	2.00E-04	0
Año 7	1.50E-04	5.00E-05
Año 8	4.50E-04	5.00E-05
Año 9	1.00E-03	1.50E-04
Año 10	1.80E-03	2.50E-04

Tabla 21.- Evolución de la probabilidad de falla anual bajo el criterio de fuga pequeña

La probabilidad de falla anual bajo el criterio de fuga pequeña al final del año 10, resultaron $1.9 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{año}}$ y $2.5 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{año}}$, en las secciones 21 y 23, respectivamente.

La grafica Gráfica 70 muestra los resultados de este análisis para las secciones donde los índices de falla anuales se presentan con mayor relevancia. Nótese que la sección 21 del ducto, que va del kilómetro 90 al kilómetro 99, está involucrada en los dos de los tres casos de criterios de fallas, y en los dos casos con valores muy por arriba de los valores típicos para este tipo de ductos.



Gráfica 70.- probabilidad de falla, bajo el criterio de fuga pequeña.

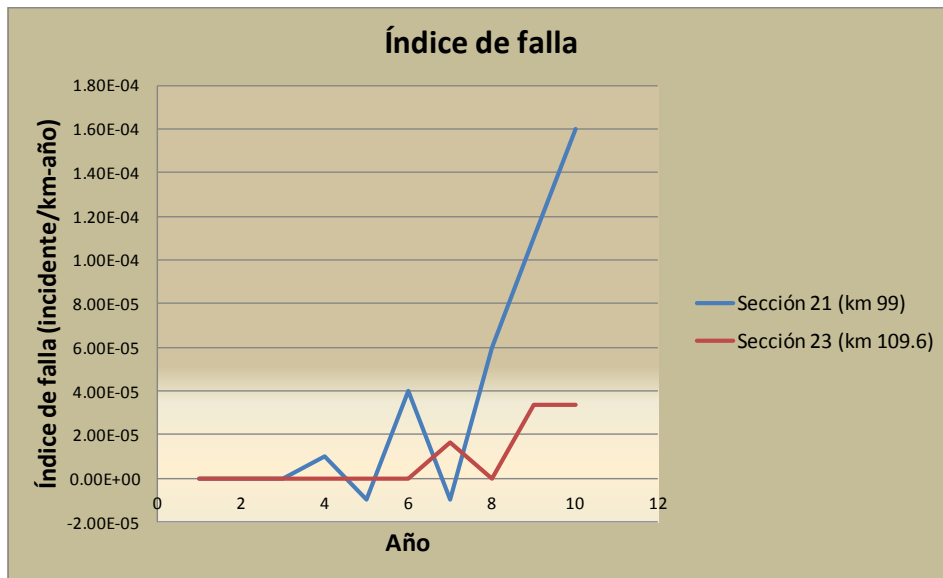
Como se comentó en los dos anteriores criterios, es necesario estimar el índice de falla anual para cada una de las secciones y para ellos se utilizó la Tabla 21 y la ecuación (36), los resultados se muestran en la Tabla 22.

**INDICE DE FALLA ANUAL
(incidentes/km-año)**

Periodo de tiempo	Sección 21 km 94 al km 99	Sección 23 km 104 al km 109.6
Año 1	0.00E+00	0.00E+00
Año 2	0.00E+00	0.00E+00
Año 3	0.00E+00	0.00E+00
Año 4	1.00E-05	0.00E+00
Año 5	-1.00E-05	0.00E+00
Año 6	4.00E-05	0.00E+00
Año 7	-1.00E-05	1.67E-05
Año 8	6.00E-05	0.00E+00
Año 9	1.10E-04	3.33E-05
Año 10	1.60E-04	3.33E-05

Tabla 22.- Índice de falla anual para la probabilidad de falla para el criterio de fuga pequeña.

De la Gráfica 71 y de la Tabla 22 se puede observar como el índice de falla anual más alto se presenta en la sección 21 con un estimado de $1.6 \times 10^{-4} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$. El índice de falla al igual que bajo los dos criterios de fallas anteriores esta por arriba del valor máximo permisible según lo que reporta el riesgo para este tipo de ductos.



Gráfica 71.- Índice de falla más severas (criterio de fuga pequeña)

Recapitulando se puede decir que, una vez que se estimó la probabilidad de falla para cada defecto, se pudo evaluar la probabilidad de falla para cada sección. Para ello se consideró que los defectos son independientes. A partir de estos resultados fue posible estimar la probabilidad de falla anual para cada sección considerando la tasa de crecimiento de los mismos. Con esta información se estimó finalmente el índice de falla anual para estas secciones considerando los tres criterios de fallas considerados: fuga pequeña, fuga grande y ruptura. Como ya se ha comentado el índice de falla anual constituye una métrica de la confiabilidad estructural de ductos al representar la rapidez con la cual ocurren las fallas en los ductos de transporte. Los resultados y conclusiones más importantes para esta Sección son

1. Para el criterio de ruptura el índice de falla anual más significativo se presentó en la sección 6 del ducto (kilómetro 17 al 21) cuyo valor fue de $4.2 \times 10^{-4} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$ al final del año 10 a partir de la fecha de inspección del ducto.
2. Para el criterio de fuga grande, el índice de falla anual más grande se presentó en la sección 23 (kilómetro 104 al kilómetro 109.6) con un valor de $9.9 \times 10^{-3} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$ al final del año 10 a partir de la fecha de inspección del ducto.
3. Para el criterio de fuga pequeña el índice de falla anual máximo se presentó en la sección 21 (kilómetro 94 al 99), con un valor de $1.6 \times 10^{-4} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$ al final del año 10 a partir de la fecha de inspección del ducto.
4. Los índices de falla anual que se estimaron para este ducto, a través del cual se ejemplificó la metodología que este trabajo propone, están por arriba del valor máximo permisible considerado como aceptable para este tipo de ducto de transporte. Los resultados ponen en evidencia que se deben considerar los transitorios de presión que se generan por la manipulación de los componentes estructurales al momento de diseñar, operar y mantener estos ductos en base a los resultados de estudios de confiabilidad estructural.

Capítulo 5- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

En el presente capítulo se comentan los resultados más importantes que arrojó la aplicación de la metodología para estimar la confiabilidad estructural de un oleoducto de 36 pulgadas de diámetro. Como ya se mencionó, para realizar dicha estimación se utilizó el sistema de cómputo para la simulación de fluidos en ductos de transporte AFT Impulse. Al simularse la operación cotidiana y extremas de los componentes estructurales del ducto fue posible, determinar tanto el régimen de presión estacionaria, como los transitorios de presión resultantes de un gran número de escenarios de operación de los componentes del ducto. Se determinó la confiabilidad estructural del ducto, expresada a través del índice de fallas, utilizando una aproximación de carga-resistencia, considerando a la distribución estadística de las presiones transitorias que superan la presión estacionaria como la distribución de carga en el ducto. Por otra parte, la distribución de la resistencia, dada por la presión de falla, se estimó a partir de la caracterización de las incertidumbres asociadas a las variables que determinan la presión de falla en cada sección del ducto afectada por corrosión.

El primer resultado importante que arroja la metodología, es que mediante la simulación de fluidos en un ducto de transporte se puede estimar la presión inicial o estacionaria en cualquier punto del ducto. Esto es de suma importancia ya que es la única información que puede ser comparada con las lecturas de presión de operación real que se reportan en campo. Sin la comparación de los resultados que arroja el simulador de fluidos con las lecturas en campo no se tendría referencia de las condiciones frontera necesarias para llevar a cabo la simulación de fluidos en un ducto y por tanto cualquier otra simulación que se haga no tendría sentido.

Una vez que la exactitud de las simulaciones de presión estacionaria se verificó, los resultados más sobresalientes que arrojaron las simulaciones de operaciones extremas de los componentes estructurales fueron los transitorios de presión que se generaron al

interior debido a la operación incorrecta de válvulas y bombas. La manipulación más crítica con respecto a la generación de sobrepresiones significativas asociadas a transitorios de presión que están relacionados con los cierres de válvulas a tiempos cortos mientras la bomba está encendida.

Las distribuciones estadísticas de los transitorios de presión que resultaron de simular la operación incorrecta de los componentes estructurales, se ajustan a una distribución de tipo Logarítmica-Normal en los kilómetros iniciales del ducto. Conforme se analizan los transitorios de presión en la proximidad a primera válvula las distribuciones estadísticas de los transitorios de presión se ajustan a la distribución Normal. En la cercanía de la segunda válvula, los transitorios de presión tienen una distribución Generalizada de Valores Extremos. Al final del ducto los transitorios se ajustan a una distribución del tipo Weibull. Es necesario comentar que las distribuciones de los transitorios de presión están relacionadas con la probabilidad que se le asocia a los escenarios, de acuerdo a la posibilidad de que ocurran según su credibilidad operativa.

Comúnmente los métodos para estimar la confiabilidad estructural en ductos bajo el principio de carga-resistencia usan a las variables de carga, es decir las presiones a la que opera el ducto, como variables que tienen una distribución estadística del tipo Gumbel con una covarianza del 5% (11). Con la metodología que se propone en este trabajo pone en evidencia que es necesario considerar los eventos extremos que se presentan durante la operación de los componentes estructurales de los ducto, debido a que las distribuciones estadísticas de los transitorios de presión cambian significativamente de una ubicación del ducto a otra.

La metodología considera la presencia de corrosión en los ductos para estimar la presión de falla, con el método de PCORRC. Este modelo de falla basado en el concepto de colapso plástico. Las presiones de fallas en cada sección de interés en el ducto, fungieron como variables de resistencia. Si bien se puede usar otro modelo de falla, los modelos que están

basados en el colapso plástico (UTS) son los modelos que tienen mejor exactitud y precisión al momento de estimar la probabilidad de falla de los ductos (22). Es por ello que se consideró el modelo PCORRC para determinar las presiones de falla asociadas a los defectos de corrosión que reportó el equipo instrumentado en el oleoducto de 36 pulgadas de diámetro que se consideró para ilustrar la aplicación de la metodología propuesta.

Una vez que se identificaron los tipos de distribuciones estadísticas de las variables de carga y de resistencia en las secciones del ducto, se usó el método de simulación de Monte Carlo para estimar la probabilidad de falla en cada sección. Se usaron los criterios de falla, fuga pequeña, fuga grande y ruptura, para identificar la probabilidad de falla y el índice de falla en el ducto.

En la industria petrolera, la probabilidad de falla es de gran utilidad para establecer la confiabilidad. Sin embargo, la estimación de la probabilidad como tal da una información limitada para poder establecer mecanismos de mantenimiento o reparación al ducto. Por lo anterior, el índice de falla es una forma de cuantificar la probabilidad de falla ya que toma como base la probabilidad de falla para hacer una estimación de el número de incidentes en un año por kilometro.

Los resultados de la estimación de los índices de falla asociados a la operación incorrecta del oleoducto que sirve para ejemplificar la metodología aquí propuesta, alcanzan valores de $4.2 \times 10^{-4} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$, $9.9 \times 10^{-3} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$ y $1.6 \times 10^{-4} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$ para un lapso de tiempo de 10 años, bajo los criterios de ruptura, fuga grande y fuga pequeña respectivamente. Estos índices de falla están por encima del valor límite que la industria considera aceptable para la operación segura y eficiente de oleoductos, que es de $1 \times 10^{-4} \frac{\text{incidentes}}{\text{km-año}}$ (12). Los valores que arrojan la estimación de los índices de falla ponen en evidencia que al tomar en cuenta la distribución estadística de los transitorios de

presión se incrementan los números incidentes por kilometro en un año por encima de lo que es aceptable desde el punto de vista de la confiabilidad y riesgo de este tipo de ducto.

El punto más importante a resaltar con respecto a estos resultados es el hecho de que las metodologías tradicionales de análisis de confiabilidad estructural de ductos no son capaces de poner en evidencia el impacto de la operación incorrecta en los niveles de confiabilidad y riesgo de los ductos de transporte. Estas metodologías se concentran en considerar las incertidumbres de la carga en la estructura alrededor de la presión estacionaria del ducto. Inclusive la aplicación de la Teoría de Valores Extremos sería incapaz de predecir los incrementos de presión debidos a transitorios originados por la incorrecta operación del ducto debido a que estos transitorios no constituyen eventos extremos de la población de presiones de operación estacionaria.

En el cierre de las válvulas así como en la operación de otros componentes estructurales del ducto se ve involucrado el ser humano como operador de los mismos. Por ende, los resultados de aplicar la metodología que aquí se propone, permite considerar los aspectos más difíciles para modelar y permite considerar el impacto de la confiabilidad humana en la confiabilidad estructural de ductos de transporte. Hasta la fecha no se contaba con una metodología que permitiera modelar y simular las condiciones de operación anómalas y que tuvieran un impacto en la estimación de la confiabilidad estructural de los ductos.

Capítulo 6- CONCLUSIONES

El presente trabajo describe una nueva metodología para la estimación de la confiabilidad estructural de ductos de transporte de hidrocarburos para condiciones de operación anómalas. Se ha mostrado que con la ayuda de un sistema de cómputo para la simulación de fluidos es posible simular los transitorios de presión que se generan debido a la manipulación de válvulas y bombas durante el tiempo de servicio de un ducto. Al considerar que estos ductos pueden presentar defectos de corrosión, así como el hecho de que existen transitorios de presión que se generan al manipularse los componentes estructurales del mismo, es posible establecer una metodología para estimar la confiabilidad estructural del ducto en condiciones de operación tanto normal como anómala.

La metodología se basa en la determinación de la distribución estadística de las presiones de operación asociadas a los transitorios de presión que resultan de la operación incorrecta del ducto. Dicha determinación se acomete considerando todos los posibles escenarios de manipulación de los accesorios de control de flujo en el ducto. A estos escenarios se les asocian probabilidades de ocurrencia en función de su nivel de credibilidad desde el punto de vista operativo. Al simular estos escenarios es posible establecer la distribución probabilística de las presiones de operación extremas generadas por los transitorios. Una vez establecida esta distribución, es posible estimar la confiabilidad estructural del ducto utilizando la aproximación de carga-resistencia, en la cual la carga está representada por la presión de operación extrema generada por el transitorio y la resistencia está dada por la presión de falla asociada a cada segmento del ducto, en presencia o no de defectos de corrosión.

Las principales conclusiones que se pueden extraer de este trabajo son:

1. Esta metodología permite considerar aspectos difíciles de modelar y simular como el impacto de la confiabilidad humana en la confiabilidad estructural de ductos de transporte.
2. La metodología permitirá modelar y simular de manera cuantitativa los escenarios de riesgo y las medidas de seguridad necesarias para abatir el creciente número de incidentes en ductos de transporte debido a errores de operación de los mismos.
3. Con la ayuda de un sistema de cómputo para la simulación de fluidos, como AFT Impulse, es posible identificar la presión que el fluido genera al interior del ducto debido a la manipulación simulada de los componentes estructurales (bomba, válvulas).
4. Con este sistema, es igualmente posible confirmar la presión estacionaria que presenta el ducto de manera cotidiana.
5. El simular la manipulación extrema de los componentes estructurales (bomba, válvulas) del ducto permite visualizar de manera gráfica los incrementos de presión al interior del ducto que resultan de su operación incorrecta.
6. La manipulación de las válvulas a tiempos de cierre cortos de cierre generan los transitorios de presión al interior del ducto más severos.
7. Los transitorios de presión están relacionados con los cierres cortos de las válvulas y no con el modo de cierre.
8. Los transitorios de presión más severos se presentan cuando la bomba está encendida en combinación con el cierre de las válvulas a tiempos cortos.
9. Los transitorios de presión al inicio del ducto están asociados a la transición de la bomba del estado de encendida al estado de apagada, en combinación con el cierre de la válvula más cercana a la bomba a tiempos cortos.
10. La distribución estadística de los transitorios de presión, cuando tienen una probabilidad de ocurrencia, están relacionados con las válvulas que generan los golpes de ariete.

11. Los transitorios de presión tienen una distribución estadística Logarítmica-Normal en las secciones iniciales del ducto. Conforme los transitorios de presión se aproximan a la primera válvula tienen asociada una distribución estadística del tipo Normal. Muy cerca de la segunda válvula, los transitorios de presión tienen una distribución estadística Generalizada de Valores Extremos. Al final del ducto los transitorios se presentan con una distribución Weibull.
12. La función de distribución de las presiones de falla debido a los defectos de corrosión, con pérdida de metal externa, detectada por la inspección con equipo instrumentado, está determinada por la incertidumbre de las variables que usa el modelo PCORRC para estimar la presión de falla.
13. Se estimó la confiabilidad estructural por primera vez, usando los transitorios de presión generados por la simulación de eventos cotidianos o extremos, como variables de carga.
14. La confiabilidad que se estimó para el ducto que permite ejemplificar la aplicación de la metodología propuesta resultó inferior a lo que se considera aceptable para ductos de transporte de hidrocarburos.

Finalmente, este estudio ha mostrado que la confiabilidad estructural de ductos de transporte de hidrocarburos se debe acometer considerando tanto las condiciones cotidianas de operación, como las condiciones anómalas de operación que se pueden derivar de la manipulación incorrecta de los accesorios de estos ductos.

Hasta la fecha no se contaba con las herramientas de modelación y simulación necesarias para considerar dichas condiciones de operación anómalas. El desarrollo de la metodología presentada en esta tesis permitirá llenar ese vacío en el campo de la confiabilidad estructural de ductos.

LIMITANTES Y TRABAJOS FUTUROS.

Las limitantes para este trabajo se presentan a continuación:

1. A los estados se les estableció una probabilidad de ocurrencia en función de la posibilidad de que ocurran en realidad, basándose en la experiencia que se tiene al trabajar con el ducto. Lo ideal sería saber el tipo de falla que se presenta en la operación de los componentes estructurales del ducto y la frecuencia con la que ocurren en campo para contar con información más contundente.
2. Para llevar a cabo las simulaciones de la operación de los componentes estructurales del ducto se requirió definir en el simulador de fluidos un control de paso de 300 segundos, lo que implica que una simulación tome un tiempo de casi 30 minutos para mostrar los resultados de la simulación. Esto es una limitante de la metodología debido a que depende del control de paso y para sistemas más complejos el tiempo que requiere para llevar a cabo la simulación es mayor.

El Trabajo futuro está encaminado en los siguientes sentidos.

1. Considerar esta metodología para el mismo ducto de transporte, ahora incrementando la cantidad de gasto, producción de crudo, lo que implica variar la presión de operación del ducto. Esto permitirá estimar la confiabilidad estructural del ducto y anticiparse a posibles fallas debido a los transitorios de presión.
2. Automatizar la simulación, es decir, generar un programa de cómputo que alimente al simulador de fluidos las condiciones de operación de los componentes estructurales del ducto para llevar a cabo las simulaciones.
3. Buscar información referente a las fallas que se presentan durante la operación de los componentes estructurales del ducto, para establecer de forma contundente el tipo y de las fallas que se presentan en dicha operación así como la frecuencia en la que se presentan.

4. Usar la Teoría de Valores Extremos para estimar la confiabilidad estructural de los ductos de transporte tomando como base la metodología que aquí se propone. Esto hará más robusta la estimación de la influencia de los transitorios de presión que se presentan durante la operación incorrecta de los componentes estructurales del ducto.

BIBLIOGRAFIA

1. Altamirando, Julio Velazquez. *Tesis de Maestría en el IPN "Modelación estadística del crecimiento de picaduras"*. 2006.
2. Rumiche, Francisco A. y Autores, Otros. *Estudio de Casos de Fallas y accidentes en Oleductos y Gasoductos*. 2005.
3. <http://primis.phmsa.dot.gov/comm/reports/safety/psi.html>. *Pipeline Safety Connects Us All*. [En línea] U.S. Department of Transportation, 05 de 02 de 2013.
4. *Reliability-based method assesses corroding oil pipeline*. F. Caleyó, J.M. Hallen, J.L. González. Mexico City : Oil & Gas Journal, 2003.
5. *NRF-030-PEMEX-2009 Diseño, construcción, inspección y mantenimiento de ductos Terrestres y recolección de hidrocarburos*. PEMEX, Comité de Normalización de. 2009.
6. *A study on the reliability assessment methodology for pipeline with active corrosion defects*. F. Caleyó, J.M. Allen, J.L. González. México DF : International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002, Elsevier.
7. *Probabilistic methods: Uses and abuses in structural integrity*. Ledger House, Forest Green Road entre otros. s.l. : Health and Safety Executive, 2001.
8. *Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo – ISBN* . Yañez, Medardo – Gómez de la Vega, Hernando, Valbuena Genebelin,. Junio 2003.
9. Tullis, J. Paul. *Hidraulic of pipelines*.
10. *Basic of Structural Reliability*. Faber, Michael Havbro. Zürich, Switzerland : s.n.
11. *Reliability based method assesses corroding pipeline*. F. Caleyó, J.M. Hallen, otros. s.l. : Oil and Gas Journal, 2003.
12. F. Caleyó, J. M. Hallen. *Confiabilidad en ductos: Experiencia del IPN*.
13. Engineering, Corrosion. *Mars G. Fontana*.
14. *The pipeline assessment manual*. A. Cosham, P. Hopkins. s.l. : Paper IPC02-27067., Proc. of IPC 2002.
15. Subsidiarios, Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos. *NRF-060-PEMEX-2006*. 2006.

16. *Method proposed for calibrating MFL, UT ILI tools.* F.Caleyó, L.Alfonso,J.M.Hallem,J.L.Gonzalez,E.Pérez Baruch. OGJ200/100, s.l. : Oil & Gas Journal, 2004.
17. R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot. *Fenómenos de transporte.* s.l. : Limusa-Wiley, 2006.
18. *Golpe de Ariete y Cavitación.* Renedo, Carlos J. ETSN 236 / ETSIT S-3 28, s.l. : Universidad de Cantabria, Termotecnia y Mecánica de Fluidos, 2002.
19. *A Reability-based approach for the condition assesment of corroding pepelines.* F. Caleyó, J.M. Allen, J.L.González, Lester Fernández and F. Augusto. s.l. : The Journal of Pipeline Integrity, 2003.
20. Guy Pluvinage, Mohamed Hamdy. *Safety, Reability and risk associated with water, oil, and gas pipeline.* s.l. : Springer.
21. *A Modified Criterion for Evaluating the Strength of Corroded Pipe.* J. F. Kiefner, P.H. Vieth,. Battelle, Ohio. : Pipeline Supervisory Committee of the AGA,, 1989, Vols. Project PR 3-805 to the.
22. *Methods for assessing corroded pipelines- Review, validation and recommendations.* Pipeline Research Council International. 2002, Vols. (PRCI). PR-273-9803.
23. D. R. Stephens, B.N. Leis, D. L. Rudland. *Development of an alternative failure criterion for residual strength of corrosion defects in moderate- to high-toughness pipe,.* s.l. : Final report on PR 3-9509 to Line Pipe Research Supervisory Committ, 1999.
24. Walpole, Myers, Myers. *Probabilidad y Estadística para Ingenieros.* s.l. : Prentice Hall.
25. Instituto Politécnico Nacional, ESIQIE, CIDIM. *REPORTE DEL ANÁLISIS HIDRÁULICO EN ESTADO ESTABLE Y TRANSITORIO DEL OLEODUCTO DE 36" D.N.* s.l. : Contrato Especifico 425016843, 2006.
26. Technology, Applied Flow. AFT Impulse, Quick Start Guide, Whatherhammer Modeling in Piping Systems. United States of America : Applied Flow Technology Corporation., 2005.
27. Tanis, Hogg and. *Probability and Statical Interference.* s.l. : Prentice Hall.
28. Enrique Castillo, Ali S. Hadi. *Extreme Value and Related Models with Applications in Engineering and Science.* s.l. : Wiley Interscience.
29. Ruskepää, Heikki. *Mathematica Navigator.* s.l. : Academic Press.
30. *RESTRENG2 user's manual.* Kiefner., P.H. vieth and J.F. Final Report on PR-218-9205, Ohio : AGA, Kiefner & Associates., 1993, Corrosion Supervisory Committee, Pipeline Research Comitte.
31. Minerals Managment Service. *Apprasial and Development of pipeline Defect Assesment Methodologies.* 2000.

32. "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines". Anon. New York, US : A Supplement to ASME B31 Code for Pressure Piping, 1991, ASME B31G-1991, The American Society of Mechanical Engineers.
33. Handbook. *Pipeline Rules of Thumb*. s.l. : Gulf Professional Publishing, 5th Edition, 2002.
34. *Piping and Pipeline Assessment*. A., Escoe. 2006.
35. *Crack Growth Analysis and Revalidation Intervals*. Forte, B.N. Leis and T.P. s.l. : Managing the Integrity of Early Pipelines, 2005., Vols. DOT-DTRS56-T-0003.
36. *Guidance for the assessment of corrosion in linepipe*. DNV, BJ &. s.l. : Version 4, 1998.
37. *Best practice for the assessment of defects in pipelines – Corrosion*. Cosham, A. s.l. : Failure Analysis, 2007.

ANEXO I

Tabla I

Km	Elevación (m)	Nodos en AFT Impulse	Km	Elevación (m)	Nodos en AFT Impulse
0.00	16.70	J1	45.97	1.30	P3
0.02	16.90	P1	46.59	-0.90	P3
1.77	-2.40	J2	47.01	1.00	P3
2.05	1.00	P2	47.53	-2.00	P3
2.08	-1.10	P2	48.03	1.00	P3
2.33	-0.10	P2	48.52	-0.40	P3
2.93	-2.20	P2	49.92	4.10	P3
4.24	-2.00	P2	52.01	-0.80	P3
5.66	3.90	P2	52.85	3.90	P3
7.09	-3.00	P2	54.79	-2.20	P3
7.45	0.40	P2	55.27	0.80	P3
7.65	-1.90	P2	55.76	0.30	P3
7.80	0.60	P2	56.41	7.60	P3
8.20	2.30	P2	57.66	9.60	P3
8.68	-0.50	P2	61.04	-10.30	P3
8.78	2.70	P2	62.40	-9.10	P3
9.62	-1.20	P2	65.20	2.50	P3
10.10	1.00	P2	67.20	-6.00	P3
10.62	-1.30	P2	68.06	-5.20	P3
10.82	1.70	P2	70.87	10.20	P3
11.55	-1.60	P2	71.60	9.70	P3
12.04	2.70	P2	75.54	-9.50	P3
12.48	-2.00	P2	79.92	3.50	P3
13.73	0.70	P2	81.19	-3.40	P3
13.95	-0.40	P2	82.68	3.60	P3
14.04	-0.40	P2	84.82	-7.40	P3
17.17	2.40	P2	86.00	1.90	P3
17.65	-2.40	P2	86.29	-10.70	P3
18.06	-1.10	P2	86.43	3.30	J4
18.46	-2.80	P2	88.24	-6.10	P4
18.95	-1.30	P2	89.41	3.20	P4
19.35	-3.30	P2	89.87	-2.50	P4
20.09	-3.50	P2	90.00	-1.30	P4
20.11	0.10	P2	91.12	14.10	P4
20.15	-3.50	P2	91.24	2.80	P4
20.66	-1.10	P2	91.39	13.80	P4

Km	Elevación (m)	Nodos en AFT Impulse
21.71	-0.30	P2
22.11	1.60	P2
22.19	-1.00	P2
22.69	1.80	P2
23.28	0.00	P2
24.08	-0.30	P2
24.11	3.20	P2
24.95	-0.80	P2
25.41	1.20	P2
25.95	1.60	P2
26.44	-1.30	P2
26.62	1.60	P2
26.64	-1.80	P2
27.07	0.60	P2
27.45	-0.90	P2
27.80	0.60	P2
28.30	-1.90	P2
29.09	3.20	P2
29.32	-1.50	P2
29.73	0.50	P2
30.23	-1.70	P2
30.66	0.50	P2
30.86	-1.60	P2
30.98	3.00	P2
31.10	-0.60	P2
31.37	0.80	P2
31.75	-0.70	P2
32.16	1.00	P2
32.97	1.30	P2
33.27	4.00	P2
33.30	0.40	P2
34.26	6.70	P2
34.32	3.50	P2
34.59	5.90	P2
35.07	3.20	P2
35.61	6.40	P2

Km	Elevación (m)	Nodos en AFT Impulse
91.64	-5.20	P4
91.80	7.10	P4
91.94	-2.70	P4
92.04	7.60	P4
92.22	-6.30	P4
92.47	11.10	P4
92.83	1.40	P4
93.02	14.40	P4
93.80	-12.60	P4
94.07	4.50	P4
94.46	-1.90	P4
94.62	7.60	P4
94.81	-3.00	P4
95.23	17.70	P4
95.52	1.50	P4
95.96	14.80	P4
96.14	-4.90	P4
96.67	19.30	P4
97.05	-8.30	P4
97.66	25.00	P4
97.99	-3.20	P4
98.60	47.40	P4
98.75	28.00	P4
99.05	72.20	P4
99.41	31.90	P4
99.55	40.90	P4
99.95	9.10	P4
100.48	49.70	P4
100.71	17.70	P4
100.92	34.00	P4
101.03	20.70	P4
101.25	43.60	P4
101.44	23.00	P4
102.01	61.10	P4
103.34	-9.00	P4
104.77	8.90	P4

Km	Elevación (m)	Nodos en AFT Impulse
35.86	4.40	P2
36.49	10.80	P2
36.78	7.10	J3
37.20	9.80	P3
41.03	-2.30	P3
41.69	0.40	P3
42.03	-1.50	P3
42.71	2.10	P3
44.91	-4.20	P3

Km	Elevación (m)	Nodos en AFT Impulse
105.53	-23.70	P4
106.13	6.20	P4
106.24	-4.20	P4
106.39	10.80	P4
106.56	-7.70	P4
106.90	17.70	P4
107.41	-22.00	P4
109.71	32.40	J5
109.72	32.30	J6

Tabla II

Resultado de la Simulación en AFT				Lecturas en Campo PEMEX (25)			
km	Presión	km	Presión	Km	Presión	Km	Presión
0.00	31.93	91.78	20.94	0.00	31.97	91.76	21.20
1.75	33.34	91.92	21.76	1.72	33.37	91.88	21.86
8.18	31.95	92.02	20.87	8.17	32.18	92.01	21.07
12.02	31.50	92.20	22.03	12.02	31.65	92.20	22.17
20.07	31.14	92.45	20.53	20.11	31.15	92.43	20.72
22.09	30.48	92.81	21.31	22.09	30.46	92.74	21.33
22.17	30.70	93.00	20.19	22.11	30.72	92.97	20.34
29.30	29.95	93.78	22.39	29.27	29.80	93.65	22.37
29.71	29.74	94.05	20.91	29.63	29.59	94.05	21.02
30.21	29.87	94.44	21.41	30.57	29.47	94.20	21.37
30.84	29.79	94.60	20.59	30.90	29.59	94.76	21.44
33.28	29.35	94.79	21.47	33.27	29.13	95.18	19.85
34.24	28.71	95.21	19.67	34.24	28.47	95.48	21.04
34.30	28.98	95.50	21.01	34.26	28.73	95.94	19.90
36.47	27.77	95.94	19.83	36.45	27.95	96.59	19.55
45.95	27.53	96.65	19.37	45.94	27.45	97.59	18.92
46.57	27.65	97.64	18.78	46.20	27.62	97.91	21.05
47.51	27.64	97.97	21.13	47.28	27.46	98.58	16.79
48.50	27.40	98.58	16.77	48.96	26.90	98.73	18.42
52.83	26.55	98.73	18.40	52.56	26.44	99.01	14.67
54.77	26.86	99.03	14.62	54.19	26.59	99.92	19.88
55.25	26.55	99.39	18.00	55.34	26.43	100.44	16.44
56.39	25.50	100.46	16.37	56.72	25.49	100.68	18.98
67.18	25.46	100.69	19.06	67.14	25.31	101.00	18.66
70.85	23.69	100.90	17.66	70.13	23.67	101.20	16.83
75.52	24.84	101.01	18.77	75.24	24.53	101.41	18.46
82.66	22.95	101.42	18.53	82.63	22.58	101.96	15.28
84.80	23.64	101.99	15.24	84.72	23.21	103.12	20.94
85.98	22.37	103.32	21.04	85.98	22.27	104.69	19.43
86.27	23.41	104.75	19.36	86.18	23.17	105.17	21.28
86.41	22.21	105.51	22.04	86.41	22.10	106.11	19.33
88.22	22.45	106.11	19.44	88.08	22.63	106.21	20.21
89.39	21.54	106.22	20.31	89.40	21.73	106.36	18.91
89.85	21.97	106.37	19.02	89.51	22.15	106.54	20.47
91.22	21.37	106.54	20.57	91.21	21.53	106.87	18.26
91.37	20.42	106.88	18.38	91.34	20.66	107.39	21.56
91.62	22.00	107.39	21.69	91.60	22.12	109.70	16.63

Tabla III: Es necesario comentar que solo se muestran 35 estados de los 4394.

Núm. De Simulación	Bomba	Válvula 1	Válvula 2	Válvula 3
3057	Boff	t2 h2	t1 g1	t1 g1
3375	Boff	t3 f3	op	t3 g3
1099	Bon	t3 f3	t3 f3	t3 f3
3417	Boff	t3 g3	t1 h1	t4 g4
1971	Bon	t4 h4	t3 h3	t3 g3
3671	Boff	t3 h3	t4 f4	t2 g2
3908	Boff	t4 g4	t1 g1	t3 g3
4107	Boff	t4 h4	t2 f2	t4 h4
3636	Boff	t3 h3	t3 f3	t3 h3
2709	Boff	t2 f2	t1 f1	t2 g2
3557	Boff	t3 h3	t1 f1	t3 g3
1431	Bon	t3 h3	t3 f3	t1 f1
587	Bon	t2 f2	t3 f3	t1 g1
1681	Bon	t4 f4	op	t2 f2
314	Bon	t1 g1	t4 h4	t1 g1
1268	Bon	t3 g3	t3 f3	t3 f3
1003	Bon	t2 h2	op	t1 g1
2285	Boff	t1 f1	t3 f3	t4 f4
1464	Bon	t3 h3	t3 h3	t3 g3
2402	Boff	t1 g1	t1 h1	t4 f4
3232	Boff	t3 f3	t1 g1	t3 g3
2620	Boff	t1 h1	t3 f3	t3 f3
3540	Boff	t3 g3	op	t2 f2
808	Bon	t2 g2	t4 g4	t1 g1
1557	Bon	t4 f4	t1 h1	t4 f4
2528	Boff	t1 g1	op	t2 h2
3244	Boff	t3 f3	t1 h1	t3 f3
3982	Boff	t4 g4	t3 g3	t2 f2
4091	Boff	t4 h4	t1 h1	t3 h3
2417	Boff	t1 g1	t2 f2	t4 h4
2369	Boff	t1 g1	t1 f1	t1 h1
3635	Boff	t3 h3	t3 f3	t3 g3
2991	Boff	t2 g2	t4 f4	t1 f1
1073	Bon	t3 f3	t2 g2	t3 f3