

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE GERENCIA DE INTEGRIDAD DE TUBERÍAS DE ACERO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Mejicano G. Eva C.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2011

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE GERENCIA DE INTEGRIDAD DE TUBERÍAS DE ACERO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Francisco Yáñez.
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Oscar Martínez.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Mejicano G. Eva C.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2011

Caracas, junio de 2011

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Eva Carolina Mejicano Gámez, titulado:

"Desarrollo De Un Programa De Gerencia De Integridad De Tuberías De Acero"

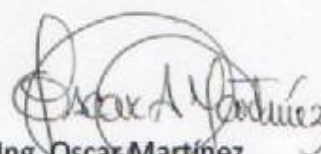
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor lo declaran APROBADO.


Prof. Johliny Casanova
Jurado




Prof. Armando Vizcaya
Jurado


Prof. Francisco Yáñez
Tutor Académico


Ing. Oscar Martínez
Tutor Industrial

DEDICATORIA

A mi familia, madre, padre, hermano,
me enseñaron que la vida se construye paso a paso, con perseverancia y fe,
me apoyaron en todos mis momentos, los buenos y malos, los alegres y tristes, los
de éxitos y fracasos,
y constituyen los tres pilares de mi existencia, las bases de quién y cómo soy.
De ustedes me queda el saber que con amor, paciencia, compromiso, honestidad,
fortaleza y unión nada es imposible,
y para ustedes, este trabajo como conclusión de otra etapa juntos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, la casa que vence las sombras y mi Alma Mater, quien me brindó la oportunidad de alcanzar mis metas y a quien le debo mi formación profesional y humana.

A mi tutor académico, Prof. Francisco Yáñez, por todo el apoyo y el ánimo para concluir de forma exitosa mi proyecto académico, y tener siempre el cariño para hacerme seguir adelante. A mi tutor industrial, el Ing. Oscar Martínez, por creer en mí desde el principio, por guiarme cuando di mis primeros pasos como una profesional, por el cariño y la dedicación incondicional, y por enseñarme que a pesar de los obstáculos, si uno se lo propone, alcanza hasta lo que se pensaba inalcanzable. Así mismo, agradezco a ABSG Consulting de Venezuela por la grandiosa oportunidad de desarrollar este Trabajo Especial de Grado junto a ellos, por las experiencias compartidas, la confianza, la enseñanza constante y la valiosa inclusión de mi persona dentro de sus áreas de trabajo.

A los Profesores Humberto Kum y Leonardo Oropeza, quienes siempre tuvieron una palabra de afecto, una buena recomendación, una sonrisa y el interés de verme siendo cada vez mejor. A todos aquellos a quienes tuve la dicha de conocer en este camino, y que hicieron de mis días en la Escuela diferentes, especiales y sobre todo, inolvidables: Luis Cardier, Freddy Torres, Kharlys Gragirena, Daniel Muñoz, Daniel Varela y Lessa Henao. Muy especialmente a Fabiana Franceschi y Benjamín Dresden, mis colegas y amigos para toda la vida, gracias por las sonrisas, la motivación y los grandes momentos compartidos.

A mi mejor amigo y mi hermano por afinidad, Alexis Cumana, sin tu apoyo, cariño totalmente desinteresado y personalidad fantástica mi camino no habría sido tan maravillosamente alegre y feliz. Gracias por todos los recuerdos que me llevo junto a ti, por todo lo que aprendimos juntos y por el cariño que forjamos y que espero

prevalezca siempre. A Vanessa Campitelli, mi gran amiga y una de las mejores personas que pudo haberse cruzado en mi camino, gracias por estar allí en todos mis momentos, los buenos y los malos. Y a José Sabbagh, por ser mi fortaleza, mi mejor motivo y mi impulso durante muchos años, esa luz al final del túnel, por creer ciegamente en mí, en mi talento y enseñarme a ser siempre la mejor persona sin importar la situación. A ti te debo gran parte de quien soy, y lo aprendido y vivido siempre lo llevaré conmigo.

A la Sra. Lulú Valero, quien influyó en gran medida sobre mi decisión de elegir la mejor casa de estudios y me motivó para alcanzar mis metas, apoyándome cuando daba mis primeros pasos en la gran UCV.

A la Sociedad de Estudiantes de Ingeniería Química (SEIQUCV), grupo que me permitió crecer más allá de los límites académicos y me brindó la oportunidad de conocer personas maravillosas con intereses similares, gracias por las experiencias, lo aprendido y lo disfrutado.

A todos aquellos que sin intención omito en este escrito, pero que me brindaron todo su cariño, buenos deseos, con quienes compartí momentos inolvidables dentro de las aulas, pasillos, laboratorios y actividades extracurriculares a lo largo de mi camino.

A mi familia, y en especial a mi madre, mi mejor amiga, por todo el amor, fortaleza, palabras, cuidados, motivación y comprensión a lo largo de estos años de estudio, eres la persona sin la cual quizá no habría podido alcanzar todo esto. A ti te lo debo.

Finalmente, y no menos importante, a Dios y la Virgen Santísima, por hacerme fuerte de espíritu, por no dejarme sola y por hacer que este recorrido fuera simplemente maravilloso.

Gracias, mil gracias.

Mejicano G., Eva C.

DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE GERENCIA DE INTEGRIDAD DE TUBERÍAS DE ACERO

**Tutor Académico: Prof. Francisco Yáñez. Tutor Industrial: Ing. Oscar Martínez.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año
2011, 100 p.**

Palabras claves: Tuberías de acero, Riesgos, Gerencia de Integridad, Corrosión,
Variables críticas.

Resumen. Las tuberías permiten el transporte y/o distribución de los fluidos en toda industria o planta de proceso. Sin embargo, existen factores que pueden influir negativamente en el óptimo desempeño de las mismas, comprometiendo su integridad y disminuyendo su eficiencia, tales como la corrosión, problemas en el diseño, deficiencias en el mantenimiento e inclusive la interacción de terceros ajenos a la instalación con las tuberías. En la mayoría de los casos, estos factores derivan en fallas que ponen en peligro la vida de las personas, comprometen el proceso y sus instalaciones o deterioran el medio ambiente, además de las implicaciones civiles, penales y altos costos asociados. Es preciso realizar estudios de integridad que permitan diagnosticar el estado actual de las tuberías a través de la estimación del riesgo con la finalidad de proponer acciones que, implementadas de manera adecuada, permitan mejorar dicho estado. Para ello, es necesario estimar la probabilidad de falla y la consecuencia asociada, parámetros que permiten calcular el nivel de riesgo de las tuberías. El primero se determina mediante una serie de variables críticas que inciden en distinta medida sobre la integridad de las tuberías, las cuales han sido descritas de acuerdo a las condiciones en las que pueden presentarse en la realidad, y además han sido agrupadas de acuerdo al factor de evaluación de fallas al que pertenezcan. Por su parte, las consecuencias han sido estimadas en función de los desembolsos máximos asociados a las severidades establecidas para los ámbitos considerados (ambiente, seguridad, proceso, instalación, imagen). Se desarrolla así una hoja sistemática computarizada que permite evaluar las condiciones de las variables críticas y las severidades por ámbito para cada una de las tuberías en estudio, y de esta manera obtener el riesgo de las mismas, expresado en dólares. De igual manera, se determina el esfuerzo necesario para disminuir el riesgo hasta un valor aceptable, y con ello se logran jerarquizar las tuberías de forma decreciente en función de estos dos parámetros, el riesgo y el esfuerzo determinado. Finalmente, se proponen acciones a implementar orientadas a mejorar el desempeño de las tuberías de mayor interés mediante la disminución del nivel de riesgo asociado a través del análisis de sus variables críticas y factores de evaluación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I	15
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
ANTECEDENTES	17
OBJETIVOS.....	19
Objetivo General.....	19
Objetivos Específicos	19
CAPÍTULO II	21
MARCO TEÓRICO.....	21
RIESGO EN TUBERÍAS.....	21
Corrosión	22
Diseño	30
Terceros.....	31
Mantenimiento.....	32
MÉTODO DE PONDERACIÓN DE VARIABLES CRÍTICAS.....	33
GERENCIA DE INTEGRIDAD	35
CAPÍTULO III	37
MARCO METODOLÓGICO.....	37
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	37

DESARROLLO DEL MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO Y APLICACIÓN PRÁCTICA	38
Identificación, ponderación y asignación de condiciones para las variables críticas y sus parámetros internos	39
Evaluación de las condiciones presentes de las variables críticas en las tuberías	42
Establecimiento de la confiabilidad de las variables críticas consideradas para cada factor de evaluación de fallas y la confiabilidad global	43
Estimación de la probabilidad de falla por factor de evaluación y la probabilidad de falla global	45
Definición del desembolso máximo por severidad para las consecuencias identificadas	46
Determinación del riesgo asociado a las tuberías mediante la probabilidad de falla y su consecuencia asociada	47
GERENCIA DE LAS TUBERÍAS EN BASE AL NIVEL DE RIESGO ASOCIADO	47
Jerarquización de las tuberías de acuerdo al nivel de riesgo	47
Propuesta de acciones a ejecutar para disminuir el nivel de riesgo	48
CAPÍTULO IV	50
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	50
IDENTIFICACIÓN Y PONDERACIÓN DE VARIABLES CRÍTICAS	50
ASIGNACIÓN DE CONDICIONES PARA LAS VARIABLES CRÍTICAS	54
EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LAS VARIABLES CRÍTICAS EN LAS TUBERÍAS	57
CONFIABILIDAD DE LAS VARIABLES CRÍTICAS POR FACTOR DE EVALUACIÓN	58

CONFIABILIDAD POR FACTOR DE EVALUACIÓN.....	64
CONFIABILIDAD GLOBAL.....	65
PROBABILIDAD DE FALLA POR FACTOR DE EVALUACIÓN	67
PROBABILIDAD DE FALLA GLOBAL	68
DEFINICIÓN DE LOS ÁMBITOS Y LA SEVERIDAD DE LA CONSECUENCIA	70
ESTIMACIÓN DE LA CONSECUENCIA GLOBAL.....	71
DETERMINACIÓN DEL RIESGO Y DEL ESFUERZO	73
JERARQUIZACIÓN POR RIESGO	77
ACCIONES PROPUESTAS	79
CAPÍTULO V	83
CONCLUSIONES	83
CAPÍTULO VI.....	86
RECOMENDACIONES	86
CAPÍTULO VII	87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
CAPÍTULO VIII.....	90
APÉNDICES	90
CÁLCULOS TIPO	90
CAPÍTULO IX	96
GLOSARIO.....	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Modelo de Matriz de Valoración Binaria.....	40
Tabla N° 2. Descripción de las variables críticas por condición.....	42
Tabla N° 3. Variables críticas seleccionadas por factor de evaluación	50
Tabla N° 4. Variables críticas por tipo de corrosión.....	51
Tabla N° 5. Matriz de Valoración Binaria para el factor de evaluación por terceros	52
Tabla N° 6. Pesos ponderados de las variables críticas para el factor de evaluación por terceros	54
Tabla N° 7. Condiciones y Peso por Condición para las variables críticas de los factores de evaluación de fallas	55
Tabla N° 8. Evaluación de las variables críticas del factor de evaluación por terceros	58
Tabla N° 9. Confiabilidad de las variables críticas del factor de evaluación por terceros, <i>Bi</i>	59
Tabla N° 10. Confiabilidad por factor de evaluación	64
Tabla N° 11. Pesos ponderados por factor de evaluación (Department Of Transportation, 2011)	66
Tabla N° 12. Confiabilidad por tramo de gasoducto evaluado	66
Tabla N° 13. Probabilidad de falla por factor de evaluación.....	67
Tabla N° 14. Probabilidad de falla por tramo de gasoducto evaluado	69
Tabla N° 15. Desembolso máximo por severidad para consecuencias por seguridad	70
Tabla N° 16. Evaluación de la severidad de consecuencia por ámbito para los tramos evaluados	71
Tabla N° 17. Nivel de esfuerzo por tramo de gasoducto evaluado	77
Tabla N° 18. Jerarquización por riesgo de los tramos evaluados.....	78
Tabla N° 19. Acciones propuestas para el tramo de mayor riesgo y esfuerzo alto...	80
Tabla N° 20. Acciones propuestas para los tramos de esfuerzo medio	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Elementos de una celda de corrosión (Davis, 2000).	25
Figura N° 2. Ánodos y cátodos locales (Bilurbina & Liesa, 2003).	26
Figura N° 3. Esquema de la medición del potencial de una tubería enterrada (Peabody, 2001).	28
Figura N° 4. Ciclo para la mejora continua del desempeño (Wiley, 2010).	35
Figura N° 5. Metodología General	37
Figura N° 6. Confiabilidad de las variables críticas para factor de evaluación por Corrosión	60
Figura N° 7. Confiabilidad de las variables críticas para el factor de evaluación por Diseño.	61
Figura N° 8. Vida útil esperada y real de los tramos de gasoducto evaluados	62
Figura N° 9. Confiabilidad de las variables críticas para el factor de evaluación por Inspección y Mantenimiento	63
Figura N° 10. Consecuencia por tramo de gasoducto evaluado	72
Figura N° 11. Riesgo por tramo de gasoducto evaluado	74
Figura N° 12. Riesgo por tramo de gasoducto evaluado y Riesgo Máximo Permitido	76

INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Especial de Grado tiene por objetivo el desarrollo de un Programa de Gerencia de Integridad para tuberías de acero, el cual contempla la determinación de un conjunto de variables que inciden de manera importante en la seguridad de las mismas, la elaboración de un modelo que permita estimar el riesgo presente y finalmente la propuesta de acciones a ejecutar que logren mitigar el nivel de riesgo estimado.

La motivación que permitió el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado viene dada por la necesidad identificada por ABSG Consulting de Venezuela, empresa consultora especializada en riesgo, gestión de activos, confiabilidad, entre otras, de realizar estudios de integridad de tuberías de manera eficiente y disminuyendo los costos asociados a este tipo de análisis, producto de la solicitud de este servicio hecha por una empresa extranjera.

La elaboración de este Trabajo Especial de Grado estuvo definida por los siguientes capítulos:

El Capítulo I está referido a los Fundamentos de la Investigación, donde se consideran los elementos que definen el problema planteado y las necesidades que deben satisfacerse para garantizar que el Programa de Gerencia de Integridad cumpla con lo esperado. Además, se presenta los antecedentes que sirve de marco referencial en el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, para finalmente definir los objetivos propuestos a alcanzar.

El Capítulo II está asociado al Marco Teórico, el cual expone gran parte de la revisión bibliográfica realizada y permite establecer los conocimientos, definiciones y teoría asociada a los elementos empleados en este Trabajo Especial de Grado. Este Capítulo facilita la comprensión de las técnicas y parámetros considerados para alcanzar cada uno de los objetivos planteados.

En el Capítulo III se presenta el Marco Metodológico empleado para el alcance de los objetivos propuestos y con el nivel de detalle suficiente tal que permite comprender la secuencia lógica y organizada que facilitó el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, donde se emplea el método de ponderación de variables críticas, la elaboración del Modelo para la Estimación del Riesgo de la tubería de acero estudiada y la final jerarquización de los tramos definidos en base al nivel de riesgo asociado.

Por su parte, en el Capítulo IV se exhiben y discuten los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta, de acuerdo a los objetivos propuestos. Este Capítulo contempla la selección de variables críticas de acuerdo al criterio de expertos, su ponderación empleando las Matrices de Valoración Binaria, el análisis de cada uno de los tramos definidos para la tubería estudiada en base a las condiciones existentes de las variables críticas, la estimación del riesgo asociado y jerarquización por nivel de riesgo, y finalmente la propuesta de acciones a ejecutar para aquellos tramos que han sido identificados como prioritarios, por tener altamente comprometida su segura operación.

Finalmente, en los Capítulos V y VI se presentan las Conclusiones y Recomendaciones respectivamente, obtenidas del análisis de los resultados obtenidos y en base a los objetivos planteados. Este análisis además facilita la identificación de puntos de mejora durante el desarrollo o elaboración del presente Trabajo Especial de Grado, así como de la metodología empleada, y que se expresan como recomendaciones para su continuación y optimización.

CAPÍTULO I
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se exponen las bases que fundamentan la investigación de este Trabajo Especial de Grado, tales como el planteamiento del problema, los antecedentes y los objetivos propuestos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Sin importar el tipo de industria o planta de proceso, las tuberías constituyen dentro de ellas los elementos fundamentales para la realización de sus funciones operacionales y el alcance de los objetivos de producción planteados. Existen cuatro aspectos fundamentales para la correcta operación de un sistema de tuberías: la seguridad, el abastecimiento continuo, la eficiencia económica y el cumplimiento de las leyes y regulaciones (Rumiche & Indacochea, 2006). A pesar de los avances tecnológicos y las diversas investigaciones en el área, las tuberías continúan presentando fallas en su estructura física que ponen en peligro la seguridad de las personas, el medio ambiente, las instalaciones y el proceso en sí. Los incidentes de seguridad que derivan de fallas en las tuberías pueden conllevar a paradas en las operaciones de producción por horas, días, semanas o incluso años. Por su parte, los incidentes severos pueden ocasionar pérdidas humanas, destrucción de la propiedad y daño al medio ambiente y los alrededores de las instalaciones, así como costos por regulaciones, implicaciones civiles y penales, e inclusive amenazas a la sobrevivencia de la empresa (Wiley, 2010). Muchas de las fallas estructurales de las tuberías tienen su origen en su diseño, en factores corrosivos producto de la interacción del fluido y/o el exterior con el material de manufactura de la tubería, en las actividades desarrolladas por terceros en zonas cercanas al lugar donde se encuentra la tubería o en la posible negligencia de las industrias para desarrollar,

planificar e implementar planes de inspección y mantenimiento que garanticen la integridad física, mecánica y operacional de la tubería. En la industria petrolera, el 33% de las fallas a nivel de tuberías de acero es producto de la corrosión (Urbaz, 2009).

Se ha despertado entonces un interés por parte de las industrias o plantas de proceso en desarrollar o buscar métodos analíticos, sistemáticos y/o automatizados orientados al diagnóstico del estado actual de los sistemas de tuberías, mediante la determinación de las causas o el impacto que tiene la ocurrencia de fallas en los mismos. Estos métodos pueden estar dirigidos a disminuir el nivel de riesgo asociado a las tuberías a través de acciones correctivas o preventivas que permitan combatir las causas de fallas, o mitigar el impacto o consecuencia de ocurrencia de dicha falla. Es sumamente importante establecer planes adecuados de evaluación de defectos y control en sistemas de ductos para garantizar una segura y eficiente operación de los mismos (Rumiche & Indacochea, 2006). Sin embargo, desarrollar estos métodos requiere la consolidación, análisis y jerarquización de información asociada a los sistemas de tuberías tal que consume una gran cantidad de tiempo, recursos humanos y técnicos. Además, la utilización de sistemas automatizados comerciales o *software* existentes en el mercado implica un desembolso importante de dinero que muchas industrias no tienen la capacidad de realizar. Es por ello que recurren a empresas consultoras especializadas en las áreas de integridad, riesgo, gestión de activos, confiabilidad y mantenibilidad, entre otras relacionadas, que efectúen el estudio de sus sistemas de tuberías de forma eficiente, confiable y con menores costos asociados.

Tal es el caso de ABSG Consulting de Venezuela, empresa consultora que ha recibido la solicitud por parte de una empresa extranjera de diagnosticar la condición actual de uno de los gasoductos que custodia, a la vez de establecer actividades orientadas a mitigar el nivel de riesgo asociado. Es por ello que ABSG Consulting de Venezuela

ha expresado la necesidad de desarrollar una herramienta sistemática computarizada que le permita realizar tal estudio de forma eficiente y confiable, a través de la gerencia del riesgo y la propuesta de acciones que influyan positivamente en la seguridad de la tubería, disminuyendo los costos por reparación/sustitución, y extendiendo así su vida útil.

ANTECEDENTES

Como antecedentes del presente Trabajo Especial de Grado, se mencionan los trabajos de investigación que contribuyeron en las bases teóricas y el enfoque de la investigación:

PDVSA Gas (2000), a través de la Gerencia de Servicios Operacionales, desarrolló una Matriz de Riesgo Mínimo contentiva de una serie de parámetros que influyen en la integridad de las tuberías de acero, los cuales de forma ponderada permiten calcular la probabilidad de falla. Por su parte, en esta Matriz también se identifican parámetros que influyen en la consecuencia, mas no se consideran todos los ámbitos que son afectados al momento de ocurrir una falla, para finalmente estimar el riesgo mínimo presente en la tubería. La estructura de esta Matriz sirve para desarrollar el Modelo para la Estimación del Riesgo en cuanto al manejo de las variables críticas identificadas, y la determinación de la probabilidad de falla y la consecuencia de los tramos de tubería definidos.

MARTÍNEZ (2003) considera la importancia de calcular apropiadamente la presión máxima de operación en áreas corroídas de tuberías, las cuales constituyen zonas cuyo espesor de pared ha disminuido producto de la corrosión que pueden derivar en fallas y poner en riesgo el proceso, las instalaciones, las personas, el medio ambiente y la tubería en sí al no ser capaces de soportar la presión de operación requerida. Es por ello que este Trabajo Especial de Maestría propone incluir la

variabilidad de los parámetros empleados en el cálculo de la Presión Máxima de Operación en Áreas Corroídas (POPAC), trabajándola como un valor probabilístico y no determinístico, obteniendo así un intervalo de presiones máximas de operación que permitan garantizar la seguridad de la tubería y sus operación, gestionando además los puntos críticos encontrados. En este Trabajo Especial de Grado se emplea el valor de la presión máxima de operación más alto o de mayor seguridad para la tubería como uno de los parámetros en el Modelo para la Estimación del Riesgo.

HERMOSO (2008) evaluó las distintas tecnologías existentes para la disposición de vapores de BTEX provenientes de la regeneración del absorbente utilizado durante la deshidratación del Gas Natural, seleccionó la mejor tecnología disponible, y finalmente elaboró el diseño preliminar de los equipos de proceso asociados a dicha tecnología. El proceso de selección se realizó mediante la aplicación de una Matriz de Valoración de Criterios, los cuales fueron tomados del Manual de Diseño de Procesos de PDVSA para la Selección de Tecnologías de Control, y una Matriz de Evaluación Técnico-Económica. Para este Trabajo Especial de Grado se emplea la metodología de Valoración de Criterios necesaria para ponderar las diferentes variables críticas consideradas en el Modelo para la Estimación del Riesgo.

ABSG CONSULTING DE VENEZUELA (2010) desarrolló un Sistema de Gestión de Integridad cuyo objetivo es establecer planes, políticas y estrategias de operación, control y mantenimiento adecuadas para equipos e instalaciones, a partir de la implementación de Prácticas de Trabajo Clase Mundial y tomando como referencia el Sistema de Gerencia de la Seguridad de los Procesos, con las cuales se logre asegurar la integridad física y mecánica de los equipos durante su tiempo de vida útil, la continuidad y confiabilidad de su operación, y la reducción tanto de los

riesgos como de los costos asociados. Este Sistema es aplicable a instalaciones nuevas o existentes, que manejen cualquier tipo de fluido y condiciones de operación, y se ajusta a las características propias del equipo o instalación sobre las cuales se pretende aplicar. Contempla la aplicación de estrategias que permitan diagnosticar o conocer la condición actual del proceso, medir su variación con respecto al modelo ideal y proponer planes para su mejora. Este trabajo sirve de guía para el desarrollo y estructuración de la Gerencia de Integridad, y propone actividades y estrategias orientadas a mitigar el riesgo que pueden tener aplicabilidad para las tuberías estudiadas.

OBJETIVOS

Se indica a continuación el objetivo general propuesto así como los objetivos específicos definidos para su cumplimiento.

Objetivo General

Desarrollar un Programa para la Gerencia de Integridad de Tuberías de Acero.

Objetivos Específicos

1. Realizar la revisión bibliográfica asociada a la integridad de las tuberías de acero, considerando conceptos de corrosión, integridad mecánica, inspección y mantenimiento y gestión de activos, así como parámetros de diseño y las normas nacionales e internacionales relacionadas.
2. Desarrollar el Modelo para la Estimación del Riesgo, el cual incluye los aspectos siguientes:
 - Identificar, ponderar y asignar condiciones a las variables críticas.
 - Evaluar las condiciones presentes de las variables críticas en las tuberías.
 - Establecer la confiabilidad de las variables críticas consideradas en cada factor de evaluación de fallas.

- Estimar la confiabilidad por factor de evaluación y la confiabilidad global.
 - Determinar la probabilidad de falla por factor de evaluación y global.
 - Definir el desembolso máximo por severidad para las consecuencias identificadas.
 - Determinar el riesgo asociado a las tuberías mediante la probabilidad de falla y su consecuencia asociada.
3. Gestionar las tuberías en base al nivel de riesgo asociado a través de:
- Jerarquizar las tuberías en función del riesgo determinado y el esfuerzo de asociado.
 - Proponer acciones a ejecutar para disminuir el nivel de riesgo.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

En este capítulo se exponen los principales conceptos relacionados con el presente Trabajo Especial de Grado, para su total comprensión y familiarización con los términos empleados.

RIESGO EN TUBERÍAS

Las tuberías se consideran los elementos fundamentales para cualquier instalación. Estas permiten el transporte o distribución de fluidos necesarios para los procesos, o del producto que se desea obtener. Las fallas de estos elementos pueden incurrir en incidentes o accidentes que pongan en peligro la vida de las personas, afectaciones severas al medio ambiente y pérdidas económicas significativas (PDVSA, IR-S-15, 2004).

Las fallas que se pueden presentar en tuberías ocurren cuando la fuerza que promueve esta falla (esfuerzo mecánico, sobre espesor) vence la resistencia del material. Dichas fallas pueden ser consideradas instantáneas o dependientes del tiempo (Rumiche & Indacochea, 2006). En el primer caso, éstas ocurren por errores del diseño, construcción, materiales o inspección muy temprano en el ciclo de vida de la estructura; inclusive podrían ocurrir luego de muchos años producto de la acción de fenómenos naturales. Las fallas dependientes del tiempo normalmente se asocian a las afectaciones como fatiga, corrosión de cualquier tipo o desgaste.

De acuerdo al Instituto Americano de Ingenieros Químicos (AIChE), las fallas en tuberías pueden ocurrir de acuerdo a tres categorías: fallas por interferencias mecánicas externas, fallas por defectos de corrosión y fallas por factores misceláneos como defectos en el material de manufactura, peligros naturales o

errores humanos (operativos) (PDVSA, IR-S-15, 2004). Para tuberías enterradas, las causas típicas de fallas están dadas por problemas en el material de manufactura debido a la corrosión o erosión, sobrepresiones o rupturas producto de excavaciones, entre otras.

Sin embargo, estas causas no sólo aplican para las tuberías enterradas, también pueden presentarse para tuberías aéreas o superficiales, sumergidas o mixtas, es decir, aquellas que tienen tramos superficiales y enterrados a lo largo de su tendido. Las causas que promueven las fallas en las tuberías serán descritas brevemente a continuación:

Corrosión

Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas de la tubería, la corrosión afecta significativamente la tenacidad de la fractura y el comportamiento del material en cuanto a fatiga. Por su parte, no tiene incidencia directa en las propiedades relacionadas a la tensión, pero la resistencia a la fatiga de los metales disminuye considerablemente en un ambiente corrosivo. “Para los aceros, la velocidad de corrosión es independiente del contenido de carbono, del esfuerzo aplicado por debajo del límite de fatiga y del tratamiento térmico” (Mangonon, 2001).

La corrosión en el material de las tuberías, a temperaturas cercanas a la ambiente, ocurre en ambientes acuosos y es de naturaleza electroquímica (Peabody, 2001). Este tipo de ambiente también se refiere al electrolito, donde para tuberías enterradas constituye la humedad del suelo. Es necesario entonces conocer qué es la corrosión, y cómo afecta las propiedades de los metales que constituyen el material de manufactura de las tuberías, afectando su desempeño.

La corrosión es un proceso natural. Existen diversas definiciones para este fenómeno, dentro de las cuales se puede mencionar “reacción química o

electroquímica entre el material, usualmente un metal, y el ambiente, tal que produce deterioro en el mismo y sus propiedades” (Davis, 2000); “alteración gradual o desgaste producto de un proceso de oxidación químico o electroquímico” (Schweitzer, 1989), e inclusive “ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su medio ambiente” (Textos Científicos, 2008). Todos estos conceptos coinciden en la idea de corrosión como el desgaste de un material metálico debido a la reacción química o electroquímica con el ambiente que lo rodea, lo cual conlleva a deterioros severos en sus propiedades.

La corrosión se da por lo general en ambientes húmedos o donde existen diferencias de potencial. A pesar de que el aire es el medio más común, son las soluciones acuosas las que se asocian con éste fenómeno, donde se incluyen aguas naturales, suelos, humedad atmosférica, lluvia y soluciones preparadas por el hombre (Textos Científicos, 2008).

Este fenómeno destructivo representa un gran problema para la ingeniería, debido a las pérdidas económicas por reemplazo de equipos corroídos, realización de mantenimiento preventivo, cese de operaciones debido a fallas de equipos por corrosión y pérdida de producto valioso, entre otras (Davis, 2000). Además, existen consecuencias de impacto social que afectan la seguridad, la salud y el ambiente de los trabajadores y personas que laboran o viven en zonas cercanas a la facilidad, y que podrían verse afectados por la presencia de fugas, derrames, explosiones, dispersiones o nubes tóxicas del producto que deriva de una falla por corrosión en una tubería.

Existen dos parámetros que permiten describir la cinética de la corrosión: la polarización y la velocidad o tasa de corrosión. El cambio de potencial a partir del estado de equilibrio como resultado de flujo de corriente se conoce como polarización (Bilurbina & Liesa, 2003). Esta desviación de potencial o polarización

puede ser medida a partir del potencial de equilibrio o potencial de corrosión, y se conoce también como sobrevoltaje o sobrepotencial (Peabody, 2001).

Por su parte, la velocidad de corrosión permite conocer la rapidez o tasa con la cual un metal se corroe de acuerdo a las condiciones a las que está expuesto. El control y medida de la velocidad de corrosión debe ser analizando el sistema metal/medio. El método más directo para determinar cuantitativamente la corrosión de un metal se basa en la pesada del mismo previo al ensayo, y luego de la exposición de éste a un medio corrosivo para un tiempo determinado. Existen además otros métodos, tales como la inspección visual, determinaciones de la profundidad del picado, cantidad de metal disuelto, cantidad de hidrógeno desprendido, cambios experimentados en las propiedades físicas, examen micro y macroscópico del metal (Bilurbina & Liesa, 2003). Algunos de los factores que influyen en la velocidad de corrosión son el pH y la presencia de oxígeno en la solución electrolítica, la temperatura, la velocidad del fluido, el tipo de agua existente (agua dura o agua blanda) y la presencia de iones más nobles en el agua.

La corrosión puede ser clasificada de acuerdo a la naturaleza de la sustancia o material que corroe, del mecanismo de corrosión presente o de la apariencia del material corroído (Davis, 2000). En el primer caso, este fenómeno puede ser seco o húmedo, dependiendo de la existencia de un medio líquido o húmedo que propicie la corrosión. En el segundo caso, la presencia o no de corriente eléctrica en el medio corrosivo es lo que permite clasificar la corrosión como electroquímica o química respectivamente. Por último, una inspección visual puede facilitar la identificación del daño producido por corrosión en las tuberías de dos formas, como uniforme, donde toda la superficie del material se corroe en la misma proporción, o localizada, donde sólo pequeñas áreas del material son afectadas (Davis, 2000).

Es importante diferenciar la corrosión química y la electroquímica, pues ésta es una de las clasificaciones más empleadas a nivel académico e industrial. La **corrosión**

química, de forma general, consiste en la disolución del material en un medio líquido corrosivo, hasta que éste se degrada o se satura el líquido (Textos Científicos, 2008). Es decir, se manifiesta por la acción directa de diferentes sustancias sobre los metales, sin que se produzcan o generen corrientes eléctricas, como el caso de un ácido sobre un metal (Gómez & Mata, 2008). Por su parte, la **corrosión electroquímica** consiste en la “reacción de un metal en un medio agresivo que se transforma en un óxido u otro compuesto termodinámicamente estable en aquellas condiciones, por medio de una reacción de óxido-reducción en un medio conductor de electricidad” (Bilurbina & Liesa, 2003). Se caracteriza por el surgimiento de corrientes eléctricas entre diferentes partes del metal como consecuencia de reacciones electroquímicas.

La celda donde ocurre la corrosión electroquímica está conformada por cuatro elementos: el ánodo, el camino iónico (electrolito), el cátodo y el camino electrónico, tal como se muestra en la Figura N° 1, cuya dinámica permite se produzca este fenómeno:

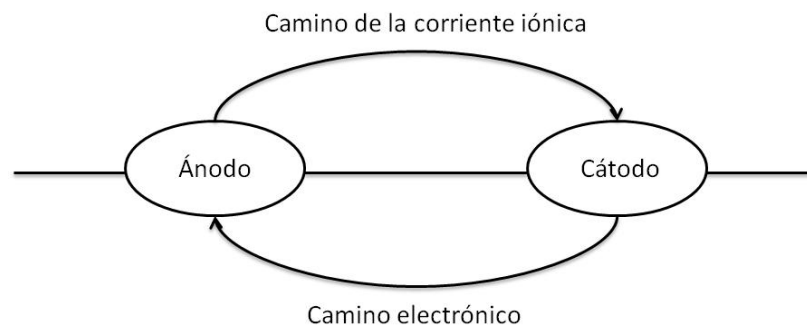


Figura N° 1. Elementos de una celda de corrosión (Davis, 2000).

En la Figura N° 1 se presentan los cuatro elementos que constituyen una celda de corrosión. El ánodo es la parte del metal que tiene carga eléctrica positiva, atrayendo hacia sí mismo los iones de carga negativa o aniones, y es donde se lleva a cabo la reacción de oxidación del metal y por lo cual éste se corroe. Por su parte, en

la parte del metal llamada cátodo se da la reacción de reducción, empleando para ello los electrones liberados durante la oxidación, y es aquí donde el metal se consume. Su carga eléctrica es negativa, y éste atrae a los iones de carga positiva o cationes. Finalmente, el electrolito o camino iónico es el medio corrosivo en el cual fluyen los iones disociados tanto del metal como del electrolito, formados por la aplicación de la corriente eléctrica, y el camino electrónico que completa el circuito y permite el paso de corriente.

Para el caso de tuberías, las celdas de corrosión se generan de forma local en distintos puntos a lo largo de la superficie del metal, como se muestra en la Figura N° 2:

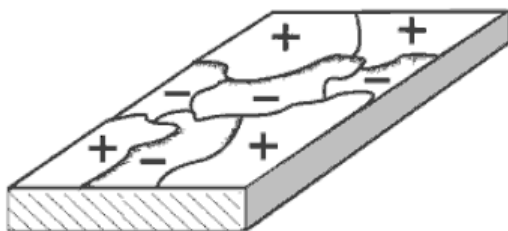


Figura N° 2. Ánodos y cátodos locales (Bilurbina & Liesa, 2003).

En la Figura N° 2 se pueden apreciar las distintas cargas que podrían aparecer en el material de las tuberías, y que conforman celdas de corrosión locales. Estas pueden formarse por variaciones en las capas protectoras, fases diferentes o cambios en el electrolito, el cual puede ser un volumen de líquido en el cual está sumergido el material, o simplemente una capa de condensado absorbida en la superficie del metal. “La velocidad de corrosión está influenciada principalmente por la conductividad eléctrica del electrolito” (Bilurbina & Liesa, 2003).

La corrosión puede ocurrir cuando se reemplaza un tramo de tubería con otro que es de acero nuevo; es un caso similar al obtenido cuando se tienen distintos tipos de metal unidos electroquímicamente (Peabody, 2001). La nueva pieza de tubería es

expuesta a las mismas condiciones corrosivas, y a pesar de que se esperaría que la misma durara más que el resto de la tubería, sucede todo lo contrario, y esta puede deteriorarse en un tiempo menor del esperado si no es aislada eléctricamente del resto del sistema.

Por otra parte, una tubería cuyo tendido esté sobre distintos tipos de suelos puede presentar fallas por corrosión, de la misma manera que éste ocurre cuando se tienen diferentes metales.

La corrosión puede generarse por diversas causas, siempre que conjuguen los cuatro elementos necesarios para su aparición. Es importante entonces considerar algunos factores que podrían fomentar su formación, y entre ellos cabe destacar la conductividad del suelo, pues aquellos considerados de alta conductividad permiten el flujo de la corriente corrosiva libremente. Un suelo mal conductor es en general menos corrosivo que uno buen conductor, sin embargo este parámetro por sí sólo no es indicativo del índice de corrosividad. Pueden producirse micropilas por diferencia de concentración cuando una tubería pasa por suelos con distintas composiciones (Bilurbina & Liesa, 2003).

Una de las medidas básicas y sencillas para contener la corrosión es eliminar uno de los cuatro (4) elementos que conforman la celda de corrosión, o en su defecto, procurar que la superficie de los materiales esté seca, con una humedad menor al 50% (Mangonon, 2001). Por su parte, si se desea realizar un estudio más detallado para mitigar el fenómeno de corrosión, se deben caracterizar los fluidos que han de transportar la tubería mediante análisis fisicoquímico, conocer las condiciones operacionales y todas aquellas variables que influyen significativamente en el mecanismo de corrosión (Gómez & Mata, 2008).

La naturaleza electroquímica de la corrosión permite detectarla cuando se tiene tuberías enterradas mediante el potencial y las corrientes que existen asociadas al

proceso corrosivo (Peabody, 2001). La medición del potencial permite conocer la resistencia del metal a la corrosión, o si existe la presencia de corrosión galvánica en la tubería. Ésta se realiza comparando el potencial de la tubería enterrada con respecto a un electrodo de referencia, ambos conectados eléctricamente, como se muestra en la Figura N° 3 a continuación:

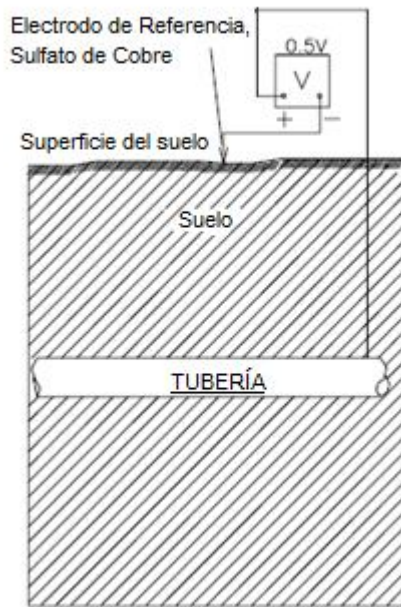


Figura N° 3. Esquema de la medición del potencial de una tubería enterrada (Peabody, 2001).

Como se muestra en la Figura N° 3, las tuberías enterradas deben ser recubiertas para resistir la corrosión externa, y provistas con un adecuado sistema de protección catódica. Los componentes expuestos que puedan ser atacados por corrosión atmosférica deben ser protegidos empleando materiales diseñados y seleccionados para resistir la corrosión atmosférica, o a través de recubrimientos (PDVSA, IR-S-15, 2004).

El sistema de protección catódica debe estar diseñado para reducir la corrosión externa, y se deben realizar lecturas del potencial del suelo regularmente para garantizar que no existe corrosión localizada. Áreas propensas a corrosión son aquellas donde existen tuberías metálicas foráneas cercanas, y se deben establecer medidas para evaluar y controlar el efecto de las mismas en la corrosión de la tubería.

La protección catódica suprime la corriente corrosiva que causa el daño en el metal, previniendo la corrosión y disolución del mismo. Toda tubería enterrada, además de ser recubierta debe ser protegida catódicamente. Este procedimiento consiste en reducir la tasa de corrosión de la superficie del metal haciéndolo el cátodo de la celda electroquímica (Peabody, 2001). Ello se logra alterando el potencial del metal en la dirección contraria (negativa) mediante el uso de una fuente externa de poder, o empleando un ánodo de sacrificio. En el primer caso, la corriente se graba en la estructura metálica gracias a un rectificador, que suministra la corriente eléctrica, junto a un ánodo enterrado en el suelo. Por su parte, cuando se trabaja con el ánodo de sacrificio, la relación galvánica existente entre el ánodo (de zinc o magnesio) y el acero de la tubería se emplea para generar la corriente necesaria para que exista la protección catódica.

Otra de las técnicas que permite controlar la corrosión de las tuberías es la utilización de recubrimientos o revestimientos. Estos normalmente conforman una película continua de un material eléctricamente aislante sobre la superficie del metal a proteger (Peabody, 2001). Su propósito es impedir que exista contacto entre el material de la tubería y el electrolito que lo rodea, promoviendo una resistencia eléctrica tal que impida la generación de reacciones electroquímicas que deriven en corrosión del metal. Sin embargo, todos los recubrimientos tienen pequeñas perforaciones independientemente de su calidad, que se generan durante la aplicación del mismo, o durante el transporte e instalación de las tuberías

revestidas. De igual manera, durante la operación de la tubería, las perforaciones se pueden producir por degradación del recubrimiento, el cual puede exponer el metal de la tubería que se desea proteger al ambiente corrosivo subterráneo, estrés del suelo o movimientos de la tubería. Una alta tasa de corrosión en las perforaciones o en las partes expuestas del metal de la tubería puede ocasionar fuga o ruptura del producto transportado o distribuido, incluso en aquellos sitios donde el recubrimiento proteja correctamente al metal (PDVSA, IR-S-15, 2004).

No sólo las fallas por corrosión tienen consecuencias económicas, también pueden afectar desde el punto de vista de seguridad para el trabajador o personas que se encuentran cercanas a la planta, por fallas repentinas en los equipos que deriven en fuegos, explosiones, pérdida de contención y colapso de las estructuras. Además, desde el punto de vista de salud, un equipo corroído puede permitir la liberación inadecuada de algún producto que afecte negativamente la salud de las personas. De igual manera, se pueden mermar los recursos naturales debido a la contaminación (Davis, 2000).

Diseño

La aplicación de principios racionales para el diseño puede eliminar problemas de corrosión, y reducir el tiempo y costo asociado a mantenimiento y reparación por este problema. La corrosión a menudo ocurre en espacios muertos o hendiduras donde el medio corrosivo se torna aún más corrosivo, y estas son áreas que pueden ser eliminadas durante el diseño. Por ejemplo, en lugares donde el SCC (*Stress Corrosion Cracking*) es posible, los componentes pueden ser diseñados para operar a niveles de estrés menores al valor de craqueo (Davis, 2000).

Para proteger una tubería contra la corrosión, es necesario que los ingenieros encargados dominen enfáticamente dos áreas de conocimiento importantes:

1. Información completa de todos aquellos detalles, características, desempeño y limitaciones que pueden tener los recubrimientos para el tipo de tubería y servicio solicitado.
2. Un resumen completo y práctico de las condiciones existentes a lo largo de la ruta propuesta para la tubería, además de la información sobre la manera en la cual se operará la misma.

De esta manera, se puede mejorar el proceso de selección del tipo de revestimiento adecuado para proteger a la tubería, y de igual manera se pueden preparar especificaciones de aplicación y planes de inspección que garanticen el mejor trabajo de revestimiento, de implementarse efectivamente (Peabody, 2001).

Terceros

Normalmente, los impactos por actividades externas de terceros sobre la tubería ocurren por desconocimiento del tercero sobre su presencia. Una manera de reducirlos es asegurando que el público general, dueños de terrenos, servicios públicos y cualquier ente ajeno a la tubería esté al tanto de su ubicación, para así brindarle la adecuada protección en aquellos lugares donde los riesgos sean elevados (PDVSA, IR-S-15, 2004).

Las fallas causadas por interferencias mecánicas externas realizadas por terceros incluyen:

- Daños por excavadoras u otros equipos empleados por otra utilidad (servicios públicos) o compañía de construcción.
- Daños producto de descarrilamientos de trenes o impactos de vehículos, camiones y cargas pesadas.
- Daños durante el proceso de arado realizado por los agricultores.

Las afectaciones producto de interferencias mecánicas externas normalmente traen consigo consecuencias severas al momento de una falla, que pueden aparecer de

inmediato o luego de un periodo de tiempo por fatiga de la tubería (PDVSA, IR-S-15, 2004).

Mantenimiento

Para garantizar la segura operación de las tuberías, altos estándares de mantenimiento deben ser ejecutados. De esta manera, se asegura que las mismas operen bajo las condiciones establecidas durante su diseño y construcción. Se deben realizar inspecciones frecuentes al sistema de protección catódica que permitan garantizar apropiadas condiciones de instalación. Además, deben existir programas de mantenimiento, contentivos de procedimientos escritos para evaluaciones e inspecciones de los equipos de la instalación. El mantenimiento debe realizarse en condiciones compatibles con los propósitos operativos y de seguridad establecidos para su reparación, reemplazo o cualquier otra actividad implementada (PDVSA, IR-S-15, 2004). Estos programas deben generar informes, acciones críticas y moderadamente críticas a ejecutar.

Es importante saber que las medidas para el control de la corrosión pueden ser altamente efectivas si son diseñadas e instaladas apropiadamente, pero sólo si van acompañadas por un mantenimiento adecuado. Si no existe un programa de mantenimiento acorde, el dinero invertido en el diseño e instalación de los controles para la corrosión se pierde.

Para un sistema de control de corrosión en tuberías, el programa de mantenimiento debe contener los siguientes aspectos, de ser aplicables:

- Evaluaciones periódicas para determinar el estado de la protección catódica y elementos relacionados.
- Procedimientos de mantenimiento para los recubrimientos y revestimientos.

- Procedimientos de mantenimiento para los ánodos galvánicos en instalaciones de protección catódica.
- Procedimientos de mantenimiento para puntos de evaluación.
- Procedimientos de mantenimiento para cruces de tuberías externas.

Se debe mantener en óptimas condiciones de operación todas las instalaciones de protección catódica, así como los demás controles de corrosión, y asegurarse de que se está proporcionando completa protección por la mayor cantidad de tiempo posible. Sin un mantenimiento y desempeño del sistema adecuado la inversión inicial no es optimizada, y el costo de controles para la corrosión invertido será un gasto (Peabody, 2001).

De igual manera, y para garantizar el control de la corrosión en el metal de las tuberías, se deben realizar inspecciones a los recubrimientos y revestimientos. Al momento de aplicarlo, debe existir conocimiento sobre el sistema de recubrimiento, las facilidades de la planta, los métodos de aseguramiento de calidad, los requerimientos de envío, el manejo, las condiciones del campo, la detección de los huecos en el recubrimiento y la reparación de los mismos.

MÉTODO DE PONDERACIÓN DE VARIABLES CRÍTICAS

De acuerdo a lo expuesto previamente, las afectaciones que puede sufrir una tubería vienen dadas por un gran número de variables o parámetros que inciden en distinta medida sobre su segura operación. Se evidencia así la necesidad de identificar los factores de riesgo presentes en una tubería para de alguna manera disminuir su valor, mejorando así el desempeño de la misma, la confianza y continuidad del proceso y la imagen de la institución responsable (American Institute of Chemical Engineers, 1999).

Se emplea entonces el Método de Ponderación de Variables Críticas, el cual se basa en lograr priorizar las variables a través de la elaboración de matrices y al cálculo de

una serie de valores que, en forma consecuyente, indicarán cuáles variables son las más importantes según su influencia al resto (Centro Internacional de Capacitación y Soporte, s.f.).

Este método considera la realización de una serie de pasos que permiten calcular valores asociados a las variables seleccionadas que facilitan su jerarquización en cuanto a importancia, dependiendo del punto de vista analizado.

Inicialmente se deben definir las N variables a comparar, para luego depurarlas o consolidarlas considerando la no repetición o redundancia de las mismas. Posteriormente, se construye la matriz de análisis N x N, donde en la primera fila y primera columna se colocan, en el mismo orden, las variables críticas seleccionadas. Se debe definir además una escala numérica o puntuación que permita calificar la influencia de una variable sobre otra. Seguidamente, se procede a comparar las filas con respecto a las columnas, y en cada una de las celdas correspondientes se coloca la puntuación que aplique. Las celdas que comparan la misma variable crítica no tienen puntaje asignado, y una vez completada toda la matriz se totalizan las filas, así como el total de la matriz.

Para determinar la influencia o peso ponderado de una variable, se determina el porcentaje de la misma mediante la relación entre el total obtenido para su fila y el puntaje total de la matriz. Obtenidos estos valores para cada variable crítica, se puede conocer cuál de estas tiene mayor influencia sobre las demás, y por ende cuál es prioritaria estudiar para garantizar una mejora en el sistema analizado.

Este método puede ser aplicado no sólo a variables críticas, sino también al momento de identificar problemas a nivel de gestión, integridad, en propuestas, iniciativas, proyectos entre otros (Centro Internacional de Capacitación y Soporte, s.f.).

GERENCIA DE INTEGRIDAD

De acuerdo a la bibliografía, Peter Drucker, uno de los consultores y autores de libros de gerencia más famoso del siglo XX define la gerencia como el uso efectivo y eficaz de los recursos disponibles para obtener resultados deseados (Silva, 2007). De igual manera, la integridad de tuberías involucra las inspecciones y análisis de resultados que permiten determinar el nivel de deterioro de las paredes de las tuberías, así como todos aquellos parámetros que influyen en su operación continua y eficiente.

La Gerencia de Integridad de Tuberías se define como el uso efectivo y eficaz de los recursos disponibles para garantizar la operatividad de las tuberías de forma eficiente, segura, confiable y continua, reduciendo los riesgos y costos asociados, y extendiendo la vida útil del activo.

La gerencia es responsable del éxito o el fracaso de un negocio. Indica el por qué es necesaria, mas no cuándo. Todo programa que busque mejorar el desempeño debe seguir, de forma general, el ciclo que se presenta en la Figura N° 4:

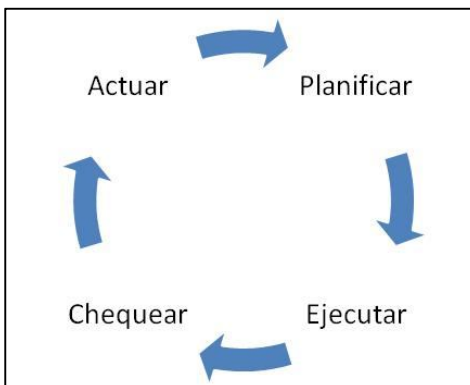


Figura N° 4. Ciclo para la mejora continua del desempeño (Wiley, 2010).

Como se expone en la Figura N° 4, la mejora continua del desempeño está determinada por cuatro premisas: planificar, donde se establecen los objetivos o aquello que se desea alcanzar; ejecutar, que involucra la realización del plan para la

mejora del desempeño; chequear, donde se hace seguimiento de las acciones llevadas a cabo y su efectividad para el proceso; y actuar, que permite identificar las oportunidades para mejorar los planes o la ejecución, y llevarlas a cabo (Wiley, 2010).

La implementación de un Programa de Gerencia de Integridad en tuberías de acero garantiza que:

- La integridad mecánica de la tubería es siempre conocida.
- Las posibles fallas de la tubería se pueden prevenir y evitar.
- Se reducen los riesgos asociados a pérdidas de contención de la tubería.
- Disminuyen los costos de mantenimiento, reparación o sustitución de la tubería por efectos de corrosión.

CAPÍTULO III
MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo describe las actividades realizadas para desarrollar el presente Trabajo Especial de Grado. La metodología empleada se define de acuerdo a los objetivos propuestos y en base al siguiente esquema:

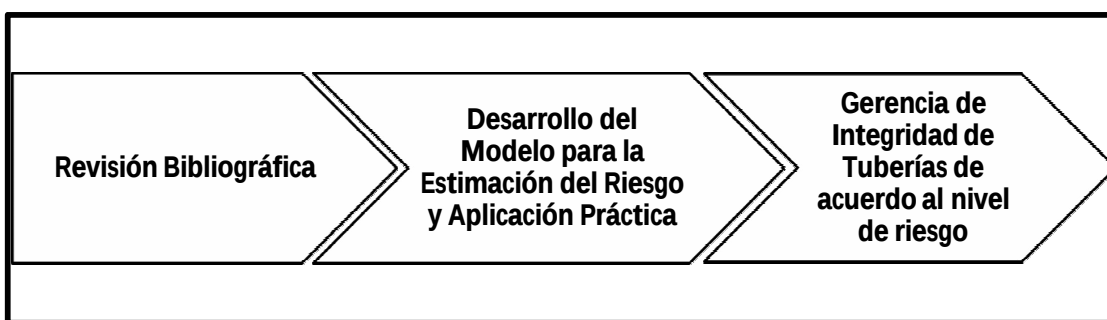


Figura N° 5. Metodología General

Cada uno de los bloques presentados en la Figura N° 5 se explican con mayor detalle a continuación:

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La investigación realizada en este Trabajo Especial de Grado se considera descriptiva y de tipo mixto, pues se basa en realidades de hecho e involucra información tanto de investigación documental como de investigación de campo (Grajales, s.f.). El alcance está orientado a tuberías de acero que transportan fluidos considerados en la industria petrolera, tales como agua, gas, crudo e inclusive fluidos criogénicos. Dentro de los diferentes mecanismos que afectan la integridad de las tuberías se considera sólo la corrosión como factor que incide negativamente en las mismas. La investigación documental considera información proveniente de normas nacionales e internacionales como las Normas PDVSA y ASME respectivamente, así

como bibliografía asociada a la corrosión, diseño de tuberías de acero, riesgo, mantenimiento, gestión de activos, y métodos de ponderación de variables críticas. Así mismo, fue necesario incluir dentro de la revisión bibliográfica aquellos aspectos que permiten establecer las condiciones de las variables críticas identificadas para cada factor de evaluación, y de esta manera estimar su ponderación de acuerdo al impacto que tienen sobre la seguridad de las tuberías.

DESARROLLO DEL MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO Y APLICACIÓN PRÁCTICA

Cuando las tuberías fallan, el resultado puede ser fatalidades, pérdidas económicas por instalaciones o producción y daño severo al medio ambiente (PDVSA, IR-S-15, 2004). Por ello, es necesario conocer el nivel de riesgo que éstas presentan, el cual se determina mediante la ecuación:

$$R = Pf * C \quad (1)$$

Donde:

R: Riesgo (\$).

Pf : Probabilidad de falla (%).

C: Consecuencia (\$).

El Modelo para la Estimación del Riesgo se basa en el cálculo de la probabilidad de falla de los tramos de tubería y el establecimiento de la consecuencia asociada. La determinación del valor de estos parámetros tiene una secuencia de actividades propia. La estimación de la probabilidad de falla de las tuberías contempla el desarrollo de los siguientes puntos:

Identificación, ponderación y asignación de condiciones para las variables críticas y sus parámetros internos

Con la finalidad de seleccionar aquellas variables que tienen incidencia directa y significativa en la integridad de las tuberías, se establecieron factores de evaluación de la probabilidad de falla con base en la revisión bibliográfica realizada y referido a los parámetros que influyen en las tasas de accidentes (PDVSA, IR-S-15, 2004), los cuales facilitan la identificación de las causas que las afectan. Así, se definieron cuatro (4) grupos o factores de evaluación:

- Factor de evaluación por terceros: consideró la acción de terceras personas ajenas a la instalación y sus procesos, que desconocen la existencia de las tuberías, o donde la protección de las mismas no es la adecuada.
- Factor de evaluación por corrosión: consideró parámetros que afectan el material de manufactura de las tuberías produciendo corrosión atmosférica, externa e interna, reduciendo el espesor nominal de pared.
- Factor de evaluación por diseño: consideró las bases y criterios empleados para el diseño de las tuberías y conocer si estos se ajustan a las condiciones operacionales establecidas.
- Factor de evaluación por inspección y mantenimiento: consideró la inadecuada inspección o frecuencia de inspección de las mismas, así como del mantenimiento no ejecutado a tiempo o de manera apropiada.

Posteriormente, se solicitó a un grupo de expertos en las áreas de corrosión, integridad, riesgo, mantenibilidad y confiabilidad completar una encuesta cuyo objetivo era la identificación de las variables que comprometen la integridad de las tuberías en base a los factores de evaluación previamente definidos, de acuerdo al criterio del experto consultado.

Una vez completadas todas las encuestas, se procedió a consolidar la información obtenida agrupando cada una de las variables críticas definidas por los consultados

en función del factor de evaluación considerado, eliminando las posibles redundancias encontradas. De esta manera, se identificaron el grupo de variables a considerar para la determinación de la probabilidad de falla de las tuberías durante el desarrollo del Modelo para la Estimación del Riesgo.

Es importante acotar que no todas las variables críticas tienen igual impacto en la integridad de las tuberías, y es por ello que fue necesario estimar el peso que tienen dentro del factor de evaluación al que pertenecen, empleando una Matriz de Valoración Binaria como la presentada en la Tabla N° 1:

Tabla N° 1. Modelo de Matriz de Valoración Binaria

	A	B	C	D	Total Filas
A					
B					
C					
D					
TOTAL MATRIZ					

Esta matriz permite evaluar la prioridad que tiene una variable crítica con respecto a otra, y se completa comparando las filas con respecto a las columnas, asignando el valor de uno (1) si la variable fila tiene mayor importancia desde el punto de vista de seguridad para las tuberías que la variable columna, o el valor cero (0) de presentarse el caso contrario, es decir, que la variable columna sea más importante para la seguridad de las tuberías que la variable fila.

Se totalizan los valores de las filas, así como el total global de la matriz, y de esta manera se puede determinar el porcentaje de incidencia que tiene una variable

crítica dentro del factor de evaluación correspondiente para las tuberías. La siguiente ecuación ilustra, a modo de ejemplo, el método para calcular el peso ponderado de la variable crítica A (Hermoso, 2008):

$$\text{Peso ponderado A} = \frac{\text{Total fila A}}{\text{Total matriz}} * 100 \quad (2)$$

Donde:

Peso ponderado A: porcentaje de la variable crítica A evaluada en la Matriz de Valoración Binaria (%).

Total fila A: puntaje total de la fila A (puntos).

Total matriz: puntaje obtenido de la totalización de las filas (puntos).

El total de fila para cada variable crítica se determinó como la sumatoria de todos los puntos asignados durante su evaluación con respecto al resto de las variables críticas.

De forma similar a la selección de las variables críticas, se solicitó al mismo grupo de expertos que completaran matrices de valoración binaria para cada uno de los factores de evaluación. De esta manera, se obtuvo valores de ponderación que responden al criterio de un grupo de expertos, lo cual permite emplearlos en el Modelo para la Estimación del Riesgo para cualquier tubería que lo requiera.

Por otra parte, se estableció para cada variable crítica una serie de condiciones que podrían presentar de acuerdo a sus características, así como un puntaje o peso por condición, tal como se muestra en el siguiente ejemplo:

Tabla N° 2. Descripción de las variables críticas por condición

Variable Crítica	Condiciones	Peso por Condición
VC1	X1	0
	Y1	5
	Z1	10
	W1	15

El número de condiciones establecidas varía de acuerdo a la variable crítica descrita, y el puntaje asignado se definió desde la condición más desfavorable o de menor seguridad para la integridad de la tubería, con un valor de cero (0) puntos, hasta la condición de mayor seguridad, cuyo puntaje dependerá del número de condiciones. Los puntajes definidos son ascendentes, incrementando cinco (5) puntos por cada condición definida, como se observa en la Tabla N° 2. Las variables críticas que sólo tienen dos condiciones fueron evaluadas con cero (0) y diez (10) puntos para las condiciones de menor y mayor seguridad respectivamente.

Evaluación de las condiciones presentes de las variables críticas en las tuberías

Con la finalidad de evaluar las condiciones en las que se presentan las variables críticas para cada una de las tuberías en estudio, se solicitó al custodio de las mismas completar una hoja sistematizada contentiva de toda la información requerida para establecer los valores de confiabilidad, probabilidad de falla, consecuencia y riesgo necesarios para el análisis de integridad final.

Esta hoja sistematizada recaba las características generales de las tuberías, tales como diámetros, espesores nominales, la longitud de los tramos o de las diferentes tuberías evaluadas, condiciones de operación y año de instalación. Además, solicita al evaluador seleccione para cada variable crítica la condición existente en las tuberías. De esta forma, se obtuvo información real que fue empleada en el Modelo

para la Estimación del Riesgo y que permitió la realización del análisis de integridad posterior.

Establecimiento de la confiabilidad de las variables críticas consideradas para cada factor de evaluación de fallas y la confiabilidad global

La confiabilidad de una variable crítica indica el nivel de confianza atribuido por ésta en la integridad de las tuberías, y este valor se determinó para todas las variables críticas consideradas en cada uno de los factores de evaluación (PDVSA Gas, 2000), empleando la siguiente ecuación:

$$Ci = Ai * Xi \quad (3)$$

Donde:

Ci: Confiabilidad de la variable crítica (puntos).

Ai: Ponderación de la variable crítica obtenida de las Matrices de Valoración Binaria.

Xi: Peso por condición de la variable crítica por tramo de tubería (puntos).

Para conocer la confiabilidad máxima de cada una de las variables críticas por factor de evaluación, se emplea la Ecuación 4, cuyos parámetros son el peso por condición de mayor puntaje, correspondiente a la condición más segura, y el peso ponderado obtenido de la Matriz de Valoración Binaria:

$$C_{m\acute{a}x} = \sum_i (Ai * Ci_{m\acute{a}x}) \quad (4)$$

Donde:

C_{máx}: Confiabilidad máxima por factor de evaluación (puntos).

Ci_{máx}: Confiabilidad máxima de la variable crítica (puntos).

Posteriormente, y con la finalidad de conocer la incidencia que tienen las variables críticas en la confiabilidad por factor de evaluación de las tuberías, se estimó el porcentaje de confiabilidad mediante la Ecuación 5:

$$\%Ci = \frac{Ci}{C_{m\acute{a}x}} * 100 \quad (5)$$

Donde:

%Ci: Porcentaje de confiabilidad de la variable crítica (%).

La suma algebraica de los porcentajes de confiabilidad de las variables críticas permitió conocer el porcentaje de confiabilidad por factor de evaluación, tal como lo expresa la Ecuación 6:

$$\%C_{FE} = \frac{\sum_i (A_i * Ci)}{C_{m\acute{a}x}} \quad (6)$$

Donde:

%C_{FE}: Porcentaje de confiabilidad por factor de evaluación (%).

El valor de confiabilidad global para cada una de las tuberías en estudio se obtuvo empleando la Ecuación 7:

$$\%C_G = \sum_i (B_{FE} * \%C_{FE}) \quad (7)$$

Donde:

%C_G: Porcentaje de confiabilidad global por tubería en estudio (%).

B_{FE}: Peso ponderado del factor de evaluación.

El peso ponderado de cada factor de evaluación se obtuvo de los datos oficiales del Departamento de Transporte (DOT) de los Estados Unidos (PDVSA Gas, 2000).

Estimación de la probabilidad de falla por factor de evaluación y la probabilidad de falla global

La probabilidad de falla de las tuberías puede definirse en función de la confiabilidad, de acuerdo a la ecuación:

$$Pf = 100 - \%C \quad (8)$$

Donde:

Pf: Probabilidad de falla (%).

%C: Confiabilidad (%).

La Ecuación (8) se empleó para determinar la probabilidad de falla por factor de evaluación, para conocer cuál de estos contribuye al deterioro de las tuberías, mediante la confiabilidad por factor de evaluación estimada. Posteriormente, la probabilidad de falla global de las tuberías en estudio se calculó a través de la Ecuación (8) y la confiabilidad global determinada previamente. Este valor es el utilizado para determinar el riesgo de cada una de las tuberías analizadas, de acuerdo a lo expresado en la Ecuación (1).

Las tuberías en estudio se evaluaron individualmente, seleccionando la condición de las variables críticas que se ajusta al estado actual de las mismas, y se obtuvo valores de confiabilidad y probabilidad de falla para cada una de ellas que permite jerarquizarlas e identificar las causas que propician sus fallas.

Definición del desembolso máximo por severidad para las consecuencias identificadas

Una vez definido el valor de la probabilidad de falla, es necesario estimar la consecuencia asociada para cada una de las tuberías en estudio. La consecuencia es dependiente del objeto de estudio, pues si fuere necesario evaluar efectos sobre el ser humano, éstas serían expresadas en función de las fatalidades o lesiones, mientras que si el objeto fuere evaluar el daño a las propiedades, tales como estructuras y edificios, las consecuencias podrían trabajarse como pérdidas económicas (PDVSA, IR-S-02, 2004).

Para estimar riesgos, se debe emplear una unidad común de medida de consecuencia. A diferencia de la probabilidad de falla, la consecuencia se trabajó en función del desembolso máximo que supone una falla en las tuberías para cada uno de los ámbitos considerados: ambiente, seguridad, instalaciones, proceso e imagen (PDVSA, IR-S-15, 2004). Este desembolso fue definido en dólares, por considerarse una moneda de uso internacional y que presenta poca fluctuación en su valor debido a de factores inflacionarios, lo cual le da estabilidad al valor de la consecuencia en el tiempo.

La consecuencia puede variar dependiendo de la severidad del evento que suceda al presentarse una falla en las tuberías, por lo que se establecieron diferentes valores de desembolsos máximos dependiendo del impacto por severidad definido. Dichos valores se ajustaron de acuerdo a las estadísticas de consecuencia presentadas por el Departamento de Transporte (DOT) de los Estados Unidos, en su reporte anual de incidentes severos (Department Of Transportation, 2011).

En la hoja sistematizada donde se evaluaron las condiciones de las variables críticas presentes en las tuberías, se solicitó la selección de la severidad de la consecuencia por ámbito definido. El valor de consecuencia global se determinó mediante la siguiente ecuación

$$C = \sum D_{m\acute{a}x} \quad (9)$$

Donde:

C: Consecuencia (\$).

$D_{m\acute{a}x}$: Desembolso máximo de la severidad por ámbito (\$).

Para cada una de las tuberías en estudio se calcula la consecuencia global mediante la suma algebraica de los desembolsos por ámbito, considerando al momento de establecer la severidad del evento la situación menos favorable o aquella que implica un mayor desembolso.

Determinación del riesgo asociado a las tuberías mediante la probabilidad de falla y su consecuencia asociada

Para cada una de las tuberías en estudio se determinó la probabilidad de falla en función de su confiabilidad global, así como el valor en dólares de la consecuencia asociada. El riesgo, por ende, se calculó como el producto entre estos dos parámetros, tal como se expuso en la Ecuación (1).

GERENCIA DE LAS TUBERÍAS EN BASE AL NIVEL DE RIESGO ASOCIADO

La gerencia de las tuberías en estudio se elaboró en base al riesgo determinado para cada una de las mismas, con la finalidad de proponer un conjunto de actividades que, implementadas, logren disminuir el nivel de riesgo elevado de aquellas que lo ameriten, o cuyo nivel se encuentre por encima del valor de riesgo permitido. Para ello, se desarrollaron las siguientes actividades:

Jerarquización de las tuberías de acuerdo al nivel de riesgo

El Modelo para la Estimación del Riesgo permite no sólo calcular el riesgo para cada una de las tuberías en estudio, sino también jerarquizarlas de acuerdo al valor obtenido. Dicha jerarquización se realizó de forma decreciente para así orientar el

análisis hacia las tuberías con mayor nivel de riesgo, dándoles prioridad sobre las de menor riesgo asociado. Además, se estableció un valor de riesgo máximo permisible, el cual fue establecido por el custodio de las tuberías, para conocer cuáles de ellas presentan niveles de riesgo que sobrepasan lo permitido por la empresa.

Finalmente, se determinó el esfuerzo necesario para disminuir el riesgo a valores aceptables o permitidos de aquellas tuberías que lo necesitaron, mediante la siguiente ecuación:

$$E = R - R_{m\acute{a}x} \quad (10)$$

Donde:

E: Esfuerzo (\$).

$R_{m\acute{a}x}$: Riesgo Máximo Permitido (\$).

Así, el esfuerzo se estimó mediante la diferencia entre el riesgo obtenido por el Modelo para la Estimación del Riesgo y el Riesgo Máximo Permitido, el cual posteriormente se clasificó de acuerdo a una escala que califica al esfuerzo en alto, medio o bajo.

Propuesta de acciones a ejecutar para disminuir el nivel de riesgo

La determinación del nivel de incidencia que tiene cada uno de los factores de evaluación, así como sus variables críticas correspondientes, facilitó la identificación de aquellas que comprometen en mayor medida la integridad de las tuberías.

Las acciones a ejecutar están orientadas a disminuir el nivel de riesgo elevado o fuera del límite permitido, y se establecieron para las tuberías de mayor nivel de riesgo identificadas. Las condiciones de baja seguridad presentadas por aquellas variables críticas que inciden negativamente sobre las tuberías se emplearon para

proponer acciones de mejora que incrementan la seguridad de las mismas, disminuyendo así el riesgo asociado.

Las acciones propuestas están dirigidas a variar la probabilidad de falla de las tuberías mejorando las condiciones de seguridad en las que se encuentran las variables críticas y aumentando la confiabilidad por factor de evaluación. Estas acciones no están orientadas a variar los valores de consecuencia establecidos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se exponen y discuten los resultados obtenidos durante el desarrollo de los objetivos propuestos para este Trabajo Especial de Grado, de acuerdo a la metodología definida.

IDENTIFICACIÓN Y PONDERACIÓN DE VARIABLES CRÍTICAS

Se realizó inicialmente la consulta a los expertos en las áreas de corrosión, integridad, riesgo, mantenibilidad y confiabilidad sobre las variables que comprometen la integridad de las tuberías de acuerdo a los factores de evaluación definidos. Este listado de variables se analizó, eliminando las redundancias y seleccionando aquellas que pudieron ser caracterizadas o medidas. Las variables críticas seleccionadas se presentan en la Tabla N°3:

Tabla N° 3. Variables críticas seleccionadas por factor de evaluación

Factor de Evaluación por Terceros	Factor de Evaluación por Corrosión	Factor de Evaluación por Diseño	Factor de Evaluación por Inspección y Mantenimiento
- Profundidad de la instalación - Actividad poblacional - Protección de la instalación - Señalización y Educación - Planes de vigilancia	- Agresividad del ambiente - Condición del tendido - Recubrimientos y Revestimientos - Protección catódica - Corrosividad del fluido - Protección interna - Mecanismos de corrosión	- Presión de operación - Prueba hidrostática - Soportes	- Inspecciones y Frecuencia de inspecciones instrumentadas - Inspección del suelo - Inspección del revestimiento - Ejecución del mantenimiento

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las variables críticas identificadas para el factor de evaluación por corrosión posteriormente fueron clasificadas de acuerdo al tipo de corrosión que potencian, tal y como se expone en la Tabla N° 4 presentada a continuación:

Tabla N° 4. Variables críticas por tipo de corrosión

Corrosión		
Atmosférica	Interna	Externa
- Agresividad del ambiente - Condición del tendido - Recubrimientos	- Corrosividad del fluido - Protección interna	- Revestimientos - Mecanismos de corrosión - Protección catódica

Las diferentes variables críticas expuestas en la Tabla N° 3 afectan la integridad de las tuberías en mayor o menor medida. Para cuantificar el impacto de las mismas, se desarrolló una Matriz de Valoración Binaria por cada uno de los factores de evaluación definidos, en la cual se evaluaron una a una las variables críticas y se determinó así su peso ponderado. En la Tabla N° 5 se presenta la Matriz de Valoración Binaria obtenida para el factor de evaluación por terceros:

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla N° 5. Matriz de Valoración Binaria para el factor de evaluación por terceros

	Profundidad de la Instalación	Actividad Poblacional	Planes de Vigilancia	Protección de las Instalaciones	Señalización	Educación Ciudadana	Total Filas	Peso Ponderado (%)
Profundidad de la Instalación		1	0	0	1	1	3	20
Actividad Poblacional	0		1	1	0	0	2	13
Protección de Instalaciones	1	0		1	1	1	4	27
Señalización	1	0	0		1	0	2	13
Planes de Vigilancia	0	1	0	0		0	1	7
Educación Ciudadana	0	1	0	1	1		3	20
TOTAL							15	100

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la Tabla N° 5 se puede apreciar la evaluación realizada a las distintas variables críticas del factor de evaluación por terceros. Esta matriz fue completada de forma binaria, asignando el valor de uno (1) cuando la variable crítica evaluada se consideró más importante desde el punto de vista de seguridad que aquella con la cual fue comparada. Nótese en la Tabla N° 5 que la comparación de las variables críticas es consistente, es decir, al comparar la fila con la columna y asignar un puntaje, a la correspondiente evaluación de la columna con la fila se le debe asignar automáticamente el puntaje contrario.

Los valores de pesos ponderados expresados en la Tabla N° 5 se determinaron mediante la aplicación de la Ecuación 2, tal como se aprecia en los Cálculos Tipo de los Apéndices, sección 1, y se observó que la protección de la instalación presenta un mayor puntaje, lo cual significa que ésta tiene una incidencia superior en la confiabilidad del factor de evaluación, y por ende aporta mayor seguridad a las tuberías. Por su parte, los planes de vigilancia influyen en menor medida en la confiabilidad de las tuberías, lo cual se evidencia en el peso ponderado presente en la Tabla N° 5. Además, se pudo corroborar que en efecto no todas las variables críticas consideradas influyen en igual medida en la confiabilidad de las tuberías, a pesar de que algunas tengan pesos ponderados iguales.

La Tabla N° 5 se desarrolló de forma similar para el resto de los factores de evaluación, considerando en cada uno las variables críticas correspondientes expuestas en la Tabla N° 3. Sin embargo, éstas no se presentan en este Trabajo Especial de Grado por confidencialidad.

La Matriz de Valoración Binaria expuesta en la Tabla N° 5 es referencial, y permite describir el análisis realizado por uno de los expertos a quienes se les solicitó completarla. Los resultados de las ponderaciones individuales obtenidas por cada uno de los expertos consultados se promediaron para generar los pesos ponderados

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

de las variables críticas necesarios para determinar su confiabilidad. En la Tabla N° 6 se exponen los resultados obtenidos para el factor de evaluación por terceros:

Tabla N° 6. Pesos ponderados de las variables críticas para el factor de evaluación por terceros

Variable Crítica, VC	Peso Ponderado, A_i (%)
Profundidad de la Instalación	27
Actividad Poblacional	13
Planes de Vigilancia	13
Protección de las Instalaciones	27
Señalización	7
Educación Ciudadana	13

En la Tabla N° 6 se evidencia la elevada incidencia que tienen la profundidad de la instalación y la protección de las instalaciones en la seguridad de la tubería, mientras que la señalización es la variable crítica que menos contribuye en la seguridad de las mismas.

Se obtuvieron así tablas similares a la Tabla N° 6 contentivas de los pesos ponderados de las variables críticas consideradas para cada uno de los factores de evaluación restantes, las cuales no han sido expuestas por confidencialidad. Estos pesos ponderados serán empleados más adelante para el cálculo de la confiabilidad para cada una de las variables críticas, de acuerdo a lo expresado en la Ecuación (3).

ASIGNACIÓN DE CONDICIONES PARA LAS VARIABLES CRÍTICAS

Las variables críticas identificadas por cada factor de evaluación se presentan en la realidad de distintas maneras, dependiendo de las características de las tuberías, de las instalaciones, de las condiciones de operación o de aquellas situaciones en las éstas puedan variar. Por ello, se definió una serie de condiciones para cada una de

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

las variables críticas consideradas en el Modelo para la Estimación del Riesgo, y se asignó un puntaje de acuerdo a la característica de seguridad presente.

Se presenta en la Tabla N° 7 las variables críticas más representativas por factor de evaluación considerado, sus condiciones y pesos por condición establecidos, seleccionadas con la finalidad de mostrar las diferencias en las condiciones definidas en función de sus características propias:

Tabla N° 7. Condiciones y Peso por Condición para las variables críticas de los factores de evaluación de fallas

Factor de Evaluación	Variable Crítica	Condición	Peso por Condición, X_i (puntos)
Por Terceros	Actividad Poblacional	Más de 46 edificaciones y edificios de numerosos pisos	0
		Más de 46 edificaciones y edificios de pocos pisos	5
		Entre 11 y 46 edificaciones	10
		Menor o igual a 10 edificaciones	15
	Protección de las instalaciones	No Existe	0
		Existe	10
Por Corrosión	Condición del tendido	Sumergida	0
		Enterrada	5
		Mixta	10
		Aérea o Superficial	15
	Corrosividad del fluido	Alta	0
		Media	5
		Baja	10
		No Corrosivo	15

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla N° 7. (Continuación)

Factor de Evaluación	Variable Crítica	Condición	Peso por Condición, X_i (puntos)
Por Diseño	Prueba Hidrostática	Mayor a 10 años desde la última prueba hidrostática	0
		Menor o igual a 10 años desde la última prueba hidrostática	10
	Soporte	No Tiene	0
		Tiene parcialmente	5
		Tiene	10
		No Aplica	15
Por Inspección y Mantenimiento	Inspecciones Instrumentadas	No Tiene	0
		Tiene	5
		No Requiere	10
	Inspección del Suelo	No Efectuada	0
		Frecuencia mayor a 12 meses	5
		Frecuencia menor o igual a 12 meses	10
		No Aplica	15

Las variables críticas expuestas en la Tabla N° 7 fueron descritas en base a lo investigado durante la revisión bibliográfica, considerando además las opiniones de los expertos en cuando a la manera en la que se presentan y observan dichas variables en las tuberías, y la forma en la cual las afectan. Las condiciones establecidas se expresan desde la más insegura hasta la de mayor seguridad, es decir, la de incidencia superior en la confiabilidad de las tuberías. El peso por condición definido permite determinar la confiabilidad de las variables críticas de acuerdo a la Ecuación (3).

EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LAS VARIABLES CRÍTICAS EN LAS TUBERÍAS

El Modelo para la Estimación del Riesgo fue desarrollado para estudiar la condición de riesgo actual del gasoducto ubicado a campo traviesa, propiedad de una empresa en Colombia, cuya longitud es de 125km. Éste cuenta con siete (7) estaciones de válvulas que permiten la interconexión entre los tramos, cada uno de 20km y con condiciones de tendido diferentes: tres tramos enterrados, uno sumergido, uno mixto y el último aéreo. El material de fabricación del gasoducto es acero API 5LX60, diámetro de 36plg y espesor de 0,438plg. Éste fue instalado en el año 1990 y se ha estimado una vida útil de treinta (30) años, operando a una presión de 900psig.

La descripción del gasoducto forma parte de la información solicitada al custodio, la cual permitió completar los parámetros generales contemplados en la hoja sistematizada que fue empleada para describir algunas de las condiciones establecidas para las variables críticas. Debido a que se trata de una sola tubería dividida en tramos, las características de manufactura, presión de operación y corrosividad del fluido se mantienen constantes a lo largo de todo el gasoducto.

Esta hoja sistemática, además, se empleó para seleccionar las condiciones en las que se presentaron las variables críticas por factores de evaluación en cada una de las tuberías evaluadas, entendiéndose por tuberías los seis (6) tramos estudiados.

En la Tabla N° 8 ilustra las condiciones seleccionadas de las variables críticas para cada uno de los tramos evaluados por terceros:

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla N° 8. Evaluación de las variables críticas del factor de evaluación por terceros

Nro. Tramo, Nt	PARÁMETROS DE EVALUACIÓN POR TERCEROS					
	Profundidad de enterramiento (cm)	Actividad Poblacional	Planes de Vigilancia	Protección de las instalaciones	Señalización	Educación Ciudadana
1	MENOR A 60	ENTRE 11 Y 46	MAYOR A MENSUAL	EXISTE	EXISTE Y MAL ESTADO	NO EXISTE
2	NO APLICA	MAS 46 Y POCOS PISOS	QUINCENAL	EXISTE	EXISTE Y MAL ESTADO	EXISTE
3	NO APLICA	MAS 46 Y POCOS PISOS	MENSUAL	NO EXISTE	EXISTE Y BUEN ESTADO	EXISTE
4	MAYOR O IGUAL A 60	ENTRE 11 Y 46	MAYOR A MENSUAL	EXISTE	NO EXISTE	NO EXISTE
5	SIN ESTUDIO	MENOR IGUAL A 10	MAYOR A MENSUAL	NO EXISTE	NO EXISTE	NO EXISTE
6	NO APLICA	MAS 46 Y NUM PISOS	MAYOR A MENSUAL	NO EXISTE	EXISTE Y BUEN ESTADO	EXISTE

La Tabla N° 8 ilustra las condiciones en las que se presentan las variables críticas del factor de evaluación por terceros para cada uno de los tramos estudiados. De forma similar se evaluaron las variables críticas asociadas a los tres factores de evaluación restantes, de acuerdo a las condiciones definidas para cada una de las mismas, las cuales no se presentan en este Trabajo Especial de Grado por consideraciones de confidencialidad.

CONFIABILIDAD DE LAS VARIABLES CRÍTICAS POR FACTOR DE EVALUACIÓN

Una vez completada la hoja sistematizada que permite describir las condiciones en las que se encuentran cada uno de los tramos del gasoducto, se procedió a calcular la confiabilidad de las variables críticas que los describen. Empleando la Ecuación (3), los pesos ponderados obtenidos de las Matrices de Valoración Binaria como los expuestos en la Tabla N° 6 y el peso por condición definido, algunos de estos presentados en la Tabla N° 7, de acuerdo a lo seleccionado en la hoja sistematizada de información solicitada, como las señaladas en la Tabla N° 8, se obtuvo la

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

confiabilidad para cada variable crítica en puntos (ver Apéndices, Sección 2). Posteriormente, conocida la confiabilidad máxima por factor de evaluación determinada mediante la aplicación de la Ecuación 4 (ver Apéndices, Sección 3), se obtuvo el porcentaje de confiabilidad por variable crítica, tal como se expresa en los Apéndices, Sección 4.

Se presenta a continuación la confiabilidad por variable crítica para el factor de evaluación por terceros, así como el porcentaje de confiabilidad calculados a partir de la Ecuación (3) y la Ecuación (5) respectivamente:

Tabla N° 9. Confiabilidad de las variables críticas del factor de evaluación por terceros, *Bi*

Nro. Tramo, <i>Nt</i>	Profundidad de Instalación		Actividad Poblacional		Planes de Vigilancia		Protección de la Instalación		Señalización		Educación Ciudadana	
	Pts	%	Pts	%	Pts	%	Pts	%	Pts	%	Pts	%
1	1,35	24	1,30	23	0,00	0	2,70	47	0,35	6	0,00	0
2	2,70	30	0,65	18	1,30	14	2,70	20	0,35	4	1,30	14
3	2,70	45	0,65	20	0,65	11	0,00	0	0,70	12	1,30	12
4	2,70	40	1,30	20	0,00	0	2,70	40	0,00	0	0,00	0
5	2,70	55	1,95	45	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
6	2,70	47	0,00	20	0,00	0	0,00	0	0,70	15	1,30	18

La Tabla N° 9 evidencia que las variables críticas del factor de evaluación por terceros tienen una incidencia diferente para cada uno de los tramos del gasoducto evaluado, como se aprecia en la columna de porcentaje de confiabilidad. Para el tramo 1, la protección de la instalación es la variable crítica que más influye en su seguridad, mientras que los planes de vigilancia y la educación ciudadana tienen influencia nula sobre el mismo. Análisis similares se pueden realizar para cada uno de los tramos del gasoducto evaluados; de forma general, se identifica en la Tabla N° 9 la profundidad de la instalación como la variable crítica que mayor incidencia tiene en la confiabilidad para 5 de los 6 tramos evaluados. Así mismo, se evidencia en la

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla N° 9 que todos los tramos presentan mínimo una variable crítica que no contribuye en su confiabilidad, a excepción del segundo tramo.

Estos valores expresados en la Tabla N° 9 se determinaron también para las variables críticas consideradas en el resto de los factores de evaluación definidos, los cuales dieron origen a una serie de gráficos que exponen la incidencia de estas variables por factor de evaluación para cada uno de los tramos evaluados, y se exhiben a continuación.

En la Figura N° 6 se presenta el porcentaje de confiabilidad de cada variable crítica del factor de evaluación por corrosión para los tramos estudiados:

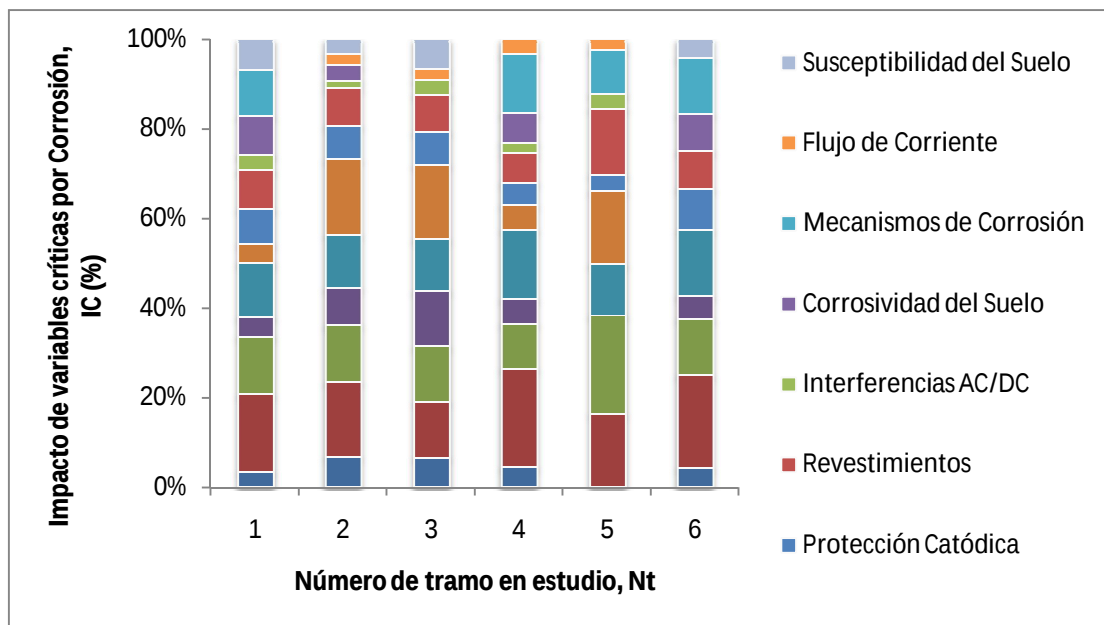


Figura N° 6. Confiabilidad de las variables críticas para factor de evaluación por Corrosión

En la Figura N° 6 se aprecia la incidencia que tiene cada una de las variables críticas consideradas en la confiabilidad del factor de evaluación por corrosión por tramo de gasoducto evaluado. Se puede observar que para los tramos 1, 4 y 6 la agresividad del ambiente es el parámetro que más aporta en la confiabilidad de los mismos,

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

mientras que para los tramos 2 y 3 es la protección interna la variable de mayor valor. Finalmente, para la confiabilidad del tramo 5, es el recubrimiento la variable de mayor incidencia. Así mismo, se pueden observar en la Figura N° 6 aquellas variables críticas por corrosión que tienen poca o mínima incidencia en la confiabilidad de los tramos evaluados, las cuales deben ser analizadas desde el punto de vista de probabilidad de falla, pues serán éstas las que más aporten en las fallas de los mismos.

De igual manera, se presenta la Figura N° 7 contentiva de las variables críticas del factor de evaluación por diseño:

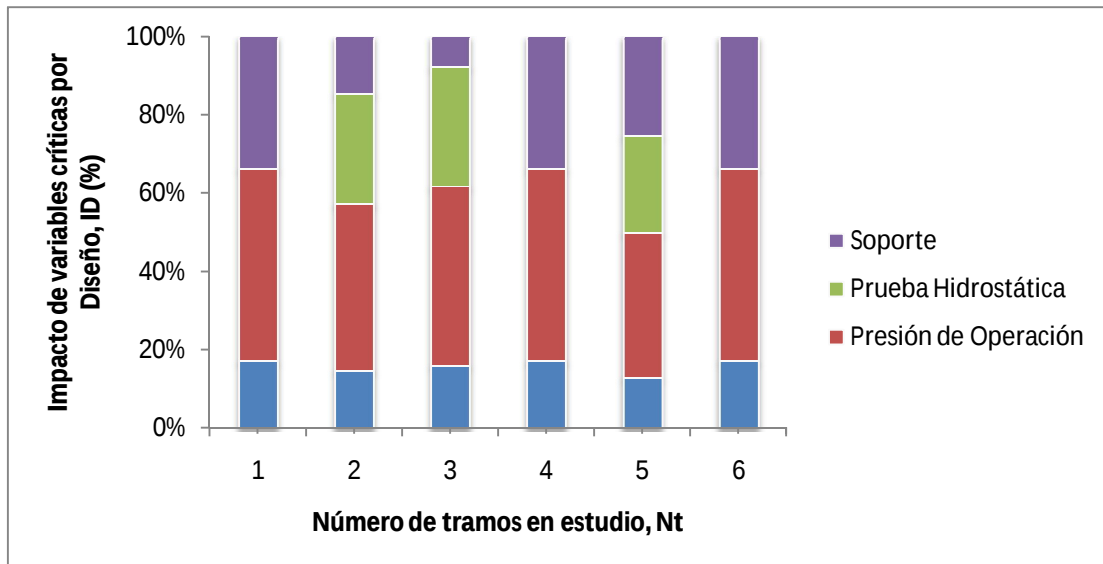


Figura N° 7. Confiabilidad de las variables críticas para el factor de evaluación por Diseño

La Figura N° 7 expone la incidencia que tienen las variables críticas en la confiabilidad por tramo de acuerdo al factor de evaluación por diseño. Al ser pocas las variables consideradas, resulta evidente el porcentaje de impacto que tienen sobre cada tramo evaluado. Así, se observa que para todos los tramos expuestos en la Figura N° 7, es la presión de operación la variable crítica de mayor importancia en la operación segura de los mismos. Esto indica que el valor de presión empleado en

el gasoducto, desde el punto de vista de seguridad, es aceptable y compromete en menor medida la operación adecuada del mismo con respecto al resto de las variables críticas consideradas.

Es importante destacar un parámetro que incide en la confiabilidad por diseño: la vida útil de la tubería. Éste se determinó mediante la tasa de corrosión presente en cada uno de los tramos, calculada a partir de la diferencia entre el espesor nominal y el espesor medido para los mismos, y la diferencia entre el espesor medido para cada tramo y el espesor mínimo o espesor de Barlow. Se solicitó además al evaluador o custodio del gasoducto estableciera un valor de vida útil esperada, en años, el cual se comparó con la vida útil estimada a partir de los espesores medidos, cuyos resultados se presentan en la Figura N° 8:

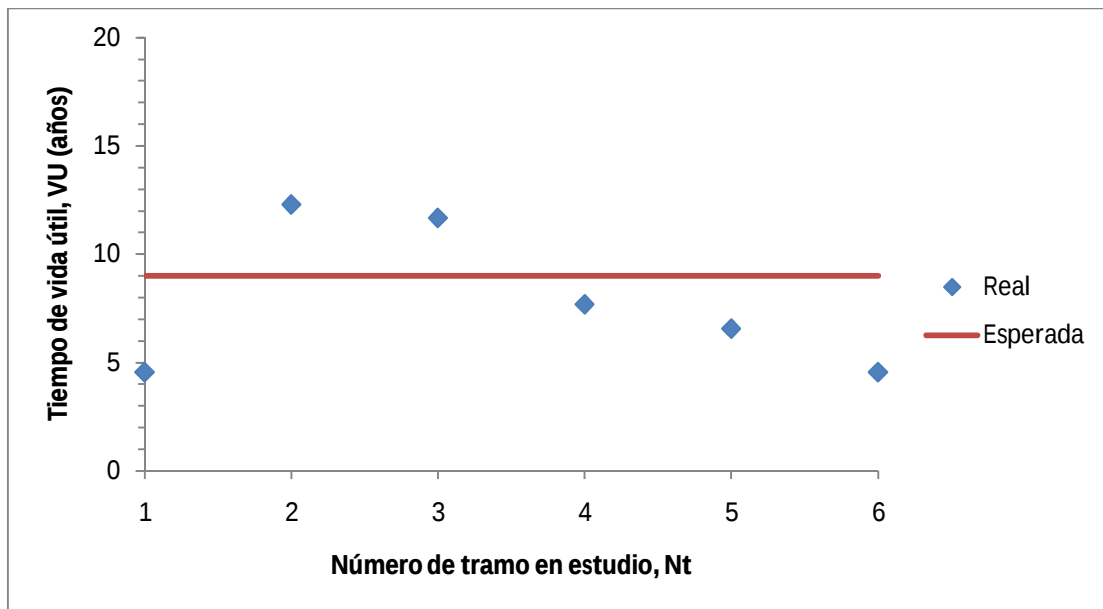


Figura N° 8. Vida útil esperada y real de los tramos de gasoducto evaluados

En la Figura N° 8 se aprecia cómo los tramos del gasoducto presentan, de acuerdo al desgaste propio, las condiciones en las que se encuentran y la interacción con el fluido y el medio que lo rodea, diferentes tiempos de vida útil, producto de la reducción de su espesor nominal. Los tramos 2 y 3 exhiben tiempos de vida útil

superior al esperado por el custodio, mientras que el resto de los tramos se encuentran por debajo del valor esperado. Esto indica que a la tasa de corrosión presente, los tramos 1, 4, 5 y 6 pueden presentar fallas que comprometan su adecuada operación en un tiempo menor al esperado. Se destacan los tramos 1 y 6 como los que, desde el punto de vista de vida útil, presentan la condición menos favorable.

Finalmente, se determinó la incidencia de las variables críticas para el factor de evaluación por inspección y mantenimiento, lo cual se observa en la Figura N° 9:

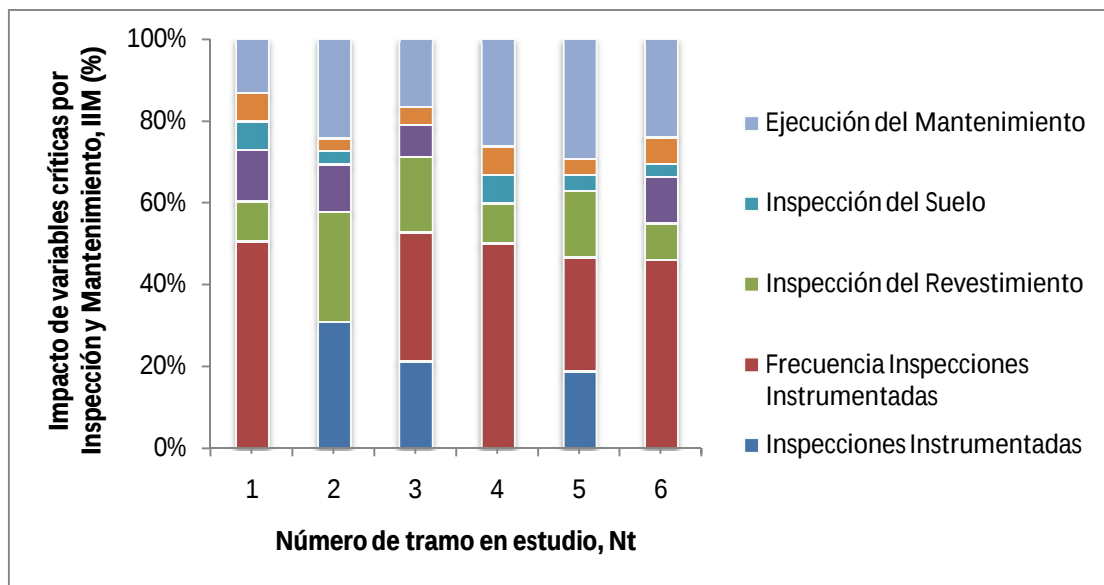


Figura N° 9. Confiabilidad de las variables críticas para el factor de evaluación por Inspección y Mantenimiento

La Figura N° 9 expone la incidencia de las variables críticas asociadas al factor de evaluación por inspección y mantenimiento en la confiabilidad de cada uno de los tramos evaluados. En éste se puede observar que para la mayoría de los tramos, la frecuencia de inspecciones instrumentadas es la variable crítica de mayor porcentaje, es decir, la que aporta en mayor medida en la confiabilidad del tramo. Por su parte, la ejecución de inspecciones instrumentadas en el tramo 2 es la variable que más incide en su confiabilidad.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De forma general, los gráficos previamente descritos muestran cómo las variables críticas influyen de manera distinta en la confiabilidad de los tramos, y permiten a su vez identificar cuáles de ellas aportan mayor seguridad en la operación de los mismos, y cuáles podrían estar comprometiendo su integridad.

CONFIABILIDAD POR FACTOR DE EVALUACIÓN

El valor de la confiabilidad por factor de evaluación se determinó al aplicar la Ecuación (6) para las variables consideradas en cada uno de los factores de evaluación por tramo evaluado (ver Apéndices, Sección5). La Tabla N° 10 presentada a continuación expone los resultados obtenidos:

Tabla N° 10. Confiabilidad por factor de evaluación

Nro. Tramo, <i>Nt</i>	CONFIABILIDAD DEL FACTOR DE EVALUACIÓN, % C_{FE} (%)			
	Por Terceros	Por Corrosión	Por Diseño	Por Inspección y Mantenimiento
1	50	68	71	52
2	80	71	82	57
3	53	73	76	83
4	59	53	71	52
5	41	66	94	93
6	42	58	71	57

En la Tabla N° 10 se exponen los valores de confiabilidad por factor de evaluación para cada uno de los tramos estudiados. Estos valores, expresados en porcentajes, indican el grado de confiabilidad que presenta el tramo con respecto a la confiabilidad máxima esperada. Así, se puede decir que el tramo 1 exhibe un 50% de confiabilidad con respecto a la condición de confiabilidad máxima establecida para la evaluación por terceros, un 68% con respecto a la confiabilidad máxima definida

por corrosión, un 71% de confiabilidad por diseño, y finalmente un 52% por los factores considerados durante la inspección y mantenimiento del tramo. Estos valores, además, indican que las variables críticas asociadas al diseño se presentan de en condiciones más seguras que aquellas asociadas a la afectación por terceros.

Para el tramo 2, nuevamente es el diseño quien aporta mayor seguridad a su desempeño con un 82% de confiabilidad, mientras que la inspección y mantenimiento de este tramo compromete en mayor medida la confiabilidad del mismo. Sin embargo, este mismo factor de evaluación aporta el mayor nivel de confiabilidad para el tramo 3, mientras que las acciones por terceros disminuyen la condición de seguridad del mismo. Por su parte, el tramo 4 presenta un 71% de confiabilidad por diseño, siendo éste el factor más alto, mientras que es la inspección y el mantenimiento quien compromete el nivel de seguridad del mismo.

Los tramos 5 y 6 presentan porcentajes de confiabilidad altos por diseño, mientras que las acciones por terceros son los valores más bajos reportados. Sin embargo, es importante destacar la confiabilidad por diseño del tramo 5, con un valor de 94%, siendo éste el porcentaje más alto reportado en la Tabla N° 10, el cual indica que este tramo tiene pocos elementos que comprometan su seguridad e integridad desde el punto de vista de diseño.

CONFIABILIDAD GLOBAL

La confiabilidad global por tramo de gasoducto evaluado fue determinado empleando la Ecuación (7), donde se realiza la suma ponderada de las confiabilidades por factor de evaluación presentadas anteriormente por el peso ponderado de los mismos (ver Apéndices, Sección 6). Estos pesos ponderados por factor de evaluación se generaron a partir de las estadísticas recuperadas por el Departamento de Transporte de Estados Unidos, los cuales se presentan en la Tabla N° 11:

Tabla N° 11. Pesos ponderados por factor de evaluación (Department Of Transportation, 2011)

Factor de evaluación	Peso Ponderado, B_{FE} (%)
Por Terceros	35
Por Corrosión	30
Por Diseño	20
Por Inspección y Mantenimiento	15

De acuerdo a lo expuesto en la Tabla N° 11 se puede deducir que la afectación por terceros es el factor que más influencia tiene sobre la integridad de la tubería con un 35%, mientras que la inspección y el mantenimiento es el factor de menor impacto, contribuyendo en sólo un 15%, independientemente del valor de confiabilidad obtenido para cada uno de estos factores de evaluación.

Los valores de confiabilidad global por tramo de gasoducto evaluado se exponen en la Tabla N° 12:

Tabla N° 12. Confiabilidad por tramo de gasoducto evaluado

Nro. Tramo, Nt	Confiabilidad Global, $\%C_G$ (%)
1	60
2	74
3	68
4	59
5	67
6	55

En la Tabla N° 12 se aprecia que el tramo 2 es el que posee la mayor confiabilidad, con un valor de 74%, mientras que el tramo 6 es el de menor porcentaje de

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

confiabilidad global. Ello indica que éste último, desde el punto de vista de confiabilidad, requiere mayor atención que el resto de los demás tramos para determinar las causas por las cuales presenta un 55% de confiabilidad.

Comparando los valores de confiabilidad por factor de evaluación expuestos en la Tabla N° 10 y de confiabilidad global encontrados en la Tabla N° 12, se evidencia que para el tramo 6 las acciones llevadas a cabo por terceros ajenos a las instalaciones está comprometiendo su confiabilidad, pues el bajo porcentaje registrado para este factor de evaluación junto al peso ponderado significativo asociado incrementan esta condición.

PROBABILIDAD DE FALLA POR FACTOR DE EVALUACIÓN

La identificación de las posibles causas de fallas en los tramos de gasoducto evaluado se puede visualizar mejor a través de la probabilidad de falla, parámetro que permite a su vez determinar el nivel de riesgo.

De acuerdo a la Ecuación (8), la probabilidad de falla se determinó mediante los valores de confiabilidad por factor de evaluación estimados. La Tabla N° 13 presentada a continuación expone los resultados obtenidos (ver Apéndices, Sección 7):

Tabla N° 13. Probabilidad de falla por factor de evaluación

Nro. Tramo, Nt	PROBABILIDAD DE FALLA DEL FACTOR DE EVALUACIÓN, P_{fFE} (%)			
	Por Terceros	Por Corrosión	Por Diseño	Por Inspección y Mantenimiento
1	50	32	29	48
2	20	29	18	43
3	47	27	24	17
4	41	47	29	48
5	59	34	6	7
6	58	42	29	43

La Tabla N° 13 presenta el porcentaje de probabilidad de falla para cada uno de los tramos estudiados por factor de evaluación. Similar al análisis realizado para los valores de confiabilidad expuestos en la Tabla N° 10, se puede identificar el factor de evaluación que mayor impacto tiene en la probabilidad de falla de los tramos. Así, para los tramos 1, 3, 5 y 6 las acciones por terceros tienen un mayor porcentaje de probabilidad de falla, lo que indica que este factor afecta en mayor medida su integridad, derivando en posibles fallas durante su operación. Por ende, las variables críticas consideradas en este factor deben ser estudiadas con mayor detalle, ya que en ellas se encuentran las causas probables que comprometen la operación segura del tramo evaluado.

Por su parte, para los tramos 2 y 4 es el factor por inspección y mantenimiento el que influye en mayor porcentaje sobre su probabilidad de falla, lo cual indica que dentro de las variables críticas consideradas en este factor de evaluación se encuentran las causas probables de falla más significativas.

Es importante señalar que el tramo 5 presenta las probabilidades de falla más bajas para los factores de evaluación por diseño e inspección y mantenimiento, con valores por debajo del 10% para cada uno. Esto indica que este tramo tiene poca probabilidad de fallar por estos factores con respecto al resto de los tramos, pues las variables críticas consideradas se encuentran en condiciones de seguridad que incrementan su confiabilidad.

PROBABILIDAD DE FALLA GLOBAL

La probabilidad de falla global por tramo de gasoducto evaluado facilita la identificación de aquellos que requieren la mayor atención, pues las condiciones en las que se encuentran actualmente pueden derivar en fallas operacionales. Estos valores fueron determinados mediante la aplicación de la Ecuación (8) junto a los

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

valores de confiabilidad global expuestos en la Tabla N° 12 (ver Apéndices, Sección 8). La Tabla N° 14 presenta los valores de probabilidad de falla por tramo evaluado obtenidos:

Tabla N° 14. Probabilidad de falla por tramo de gasoducto evaluado

Nro. Tramo, Nt	Probabilidad de Falla Global, Pf_G (%)
1	40
2	26
3	32
4	41
5	33
6	45

En la Tabla N° 14 se aprecia cómo los diferentes tramos de gasoducto evaluado exhiben probabilidades de falla independientes, que varían de acuerdo a la condición en la que se encuentren al momento del estudio. El tramo 2 presenta el valor de probabilidad de falla más bajo, con un 26%, lo cual indica que éste podría fallar menos que el resto de los tramos estudiados, es decir, tiene las condiciones más seguras en todos los factores de evaluación considerados. Por su parte, el tramo 6 es aquel cuya probabilidad de falla es la más alta de todos los tramos estudiados, lo cual indica que éste requiere mayor detalle en el análisis de las causas que derivan en este resultado. Además, el 45% de probabilidad de falla para el tramo 6 expresa la necesidad de evaluar las variables críticas que comprometen en mayor medida la integridad del mismo, y que desde el punto de vista de probabilidad de falla incrementan la posibilidad de que falle primero que cualquiera de los demás tramos.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Estos valores de probabilidad de falla global por tramo de gasoducto evaluado fueron empleados posteriormente para determinar el riesgo asociado a los mismos.

DEFINICIÓN DE LOS ÁMBITOS Y LA SEVERIDAD DE LA CONSECUENCIA

La consecuencia asociada a fallas en las tuberías fue definida en base a cinco (5) ámbitos referidos de acuerdo a la norma PDVSA SI-S-19, la cual en su Anexo C expone la Tabla de Severidad Potencial. Estos ámbitos analizan el impacto que puedan tener las fallas en tuberías sobre el ambiente, la seguridad, la instalación, los procesos y la imagen de la empresa que las custodia.

Sin embargo, los ámbitos de la consecuencia pueden tener severidades diferentes dependiendo del tipo de tubería analizado, así como de las características operacionales que ésta presente. Por ello, se definió una escala de severidad basada en el desembolso máximo asociado a una falla, expresado en dólares, para cada uno de los ámbitos establecidos. Se presenta en la Tabla N° 15 las diferentes severidades que puede ocasionar a la seguridad una falla de las tuberías:

Tabla N° 15. Desembolso máximo por severidad para consecuencias por seguridad

Ámbito	Severidad	Desembolso máximo (\$)
Seguridad	Muy Baja	10.000
	Baja	50.000
	Leve	100.000
	Moderada	500.000
	Alta	3.000.000
	Muy Alta	50.000.000

En la Tabla N° 15 se puede observar cómo para las distintas severidades establecidas el desembolso máximo varía, incrementándose su valor en la medida que la severidad es más alta (PDVSA, IR-S-15, 2004).

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para los ámbitos de ambiente, instalación, procesos e imagen se ha establecido una escala de severidad igual a la presentada en la Tabla N° 15, sin embargo los desembolsos máximos definidos para cada una son distintos, pues no es igual para una empresa responder ante afectaciones al ambiente producto de fallas en sus tuberías que por afectaciones al proceso.

ESTIMACIÓN DE LA CONSECUENCIA GLOBAL

La hoja sistematizada contentiva de la información necesaria y las condiciones de las variables para determinar el riesgo de las tuberías también permitió al evaluador seleccionar la severidad por ámbito de la consecuencia que más se ajusta al tramo de gasoducto estudiado de ocurrir una falla. La Tabla N° 16 presentada a continuación muestra las severidades presentes en los tramos evaluados:

Tabla N° 16. Evaluación de la severidad de consecuencia por ámbito para los tramos evaluados

Nro. Tramo, Nt	SEVERIDAD DE LA CONSECUENCIA				
	Ambiente	Seguridad	Procesos	Instalación	Imagen
1	Muy Baja	Baja	Leve	Baja	Leve
2	Moderada	Leve	Moderada	Baja	Moderada
3	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Moderada
4	Moderada	Baja	Baja	Baja	Leve
5	Baja	Muy Baja	Baja	Baja	Alta
6	Leve	Baja	Leve	Baja	Moderada

La Tabla N° 16 expone la evaluación de la severidad seleccionada por ámbito de la consecuencia para cada uno de los tramos evaluados por parte del evaluador. Se evidencia que, dependiendo de las características propias del tramo, las consecuencias producto de una falla tienen impactos diferentes. En la Tabla N° 16

resalta el tramo 5, quien presenta una consecuencia alta a nivel de imagen de ocurrir una falla, siendo esta severidad la más alta de todas las seleccionadas para los tramos evaluados. Sin embargo, desde el punto de vista de seguridad, exhibe una consecuencia muy baja. Esto demuestra que las posibles fallas en las tuberías o tramos evaluados impactan de distinta manera en cada uno de los ámbitos definidos.

La determinación del valor de consecuencia global se realizó mediante la sumatoria de los desembolsos máximos por ámbito establecidos para cada uno de los tramos evaluado, obtenidas como se expone en los Apéndices, Sección 9. Cada una de las severidades seleccionadas, presentadas en la Tabla N° 16, tiene asociada un desembolso máximo dependiendo del ámbito al que se refieran, como el mostrado en la Tabla N° 15 para la seguridad. La sumatoria de estos valores permite estimar la consecuencia global por tramo, cuyos resultados se presentan en la Figura N° 10 a continuación:

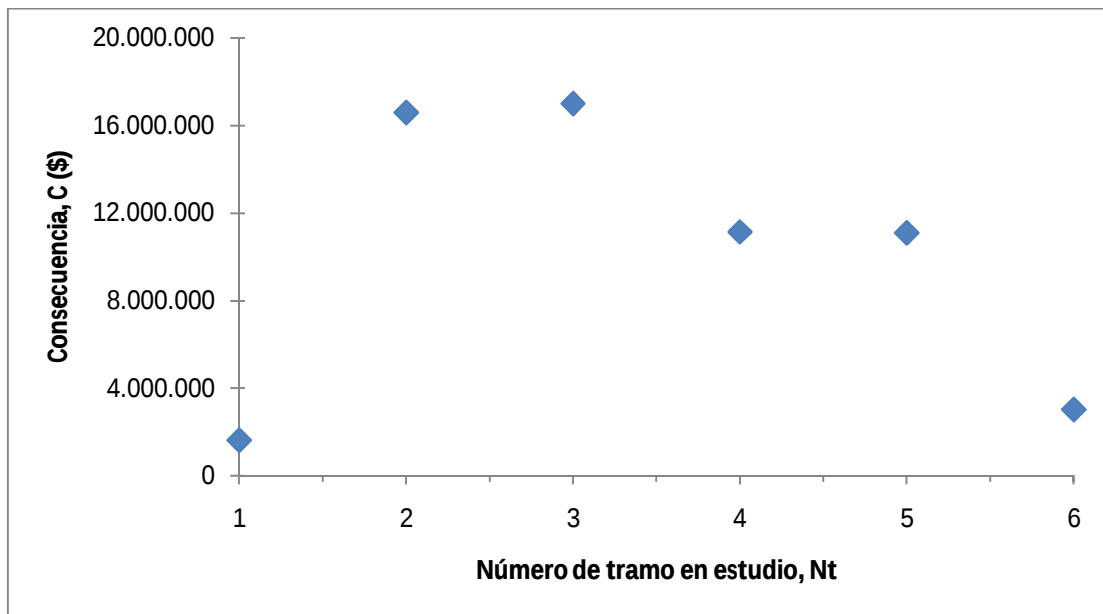


Figura N° 10. Consecuencia por tramo de gasoducto evaluado

La Figura N° 10 permite identificar los tramos que representarían un mayor costo por responsabilidad y respuesta oportuna para la empresa que custodia el gasoducto producto de fallas en los mismos. Estos valores, además, fueron empleados posteriormente para determinar el riesgo de cada tramo evaluado.

En la Figura N° 10 se pueden apreciar los distintos valores obtenidos en cada uno de los tramos evaluados para la consecuencia asociada a una falla de los mismos. Claramente se observa que el tramo 3 es quien representa el mayor desembolso para el custodio de ocurrir una falla en el mismo, mientras que el tramo 1 es el de menor valor de consecuencia asociado. Por ende, desde el punto de vista de consecuencias se puede decir que los tramos 2 y 3 representan los de mayor desembolso, para los cuales se debe analizar su probabilidad de falla y así evitar costos elevados asociados a fallas en los mismos.

DETERMINACIÓN DEL RIESGO Y DEL ESFUERZO

El riesgo para cada uno de los tramos evaluados se determinó mediante la aplicación de la Ecuación (1), que involucra el producto de los valores de probabilidad de falla global por consecuencia global estimados previamente (ver Apéndices, Sección 10). La Figura N° 11 presentada a continuación expone los valores de riesgo relativo, expresados en dólares, para cada uno de los tramos de gasoducto definidos:

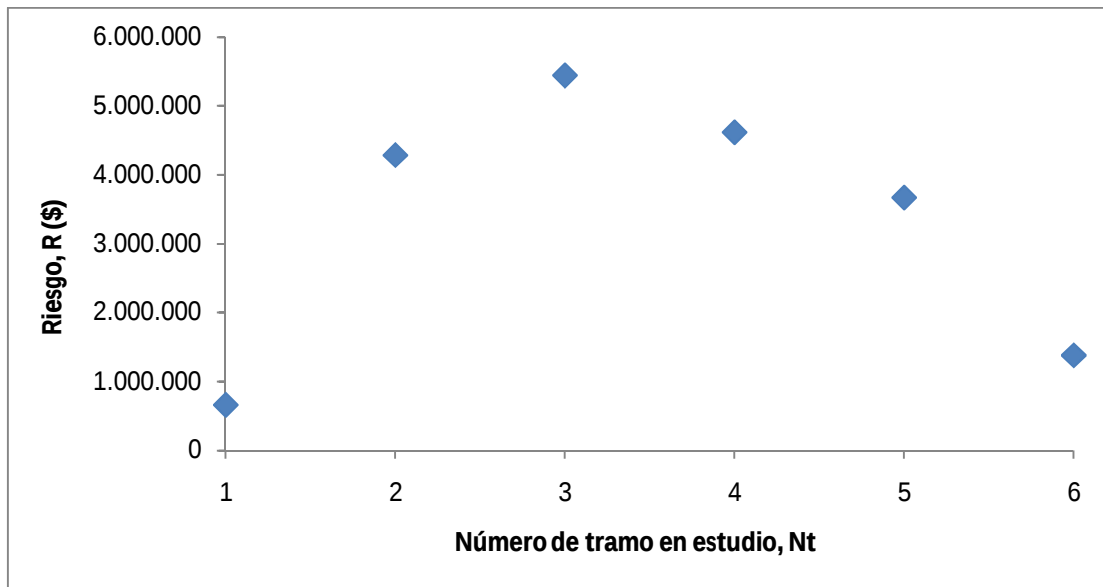


Figura N° 11. Riesgo por tramo de gasoducto evaluado

La Figura N° 11 permite identificar el tramo de gasoducto evaluado que mayor nivel de riesgo presenta, así como aquel que tiene menor riesgo asociado, y orientar las acciones a ejecutar al tramo que requiera disminuirlos.

Se aprecia en la Figura N° 11 que el tramo 3 es quien presenta el riesgo más elevado con respecto al resto de los tramos evaluados, con un valor superior a los US\$5.000.000, mientras que el nivel más bajo de riesgo se encuentra en el tramo 1. Esta jerarquización inicial dirige la atención hacia el tramo 3 como aquél al cual se le propondrán acciones que mitiguen el alto nivel de riesgo presente.

Así mismo, al comparar las Figuras N° 10 y 11 se puede apreciar que a pesar de la elevada consecuencia asociada al tramo 2, su nivel de riesgo disminuye con respecto al tramo 3, que se mantiene como el de mayor riesgo relativo. Además, a pesar de que los valores de consecuencia expuestos en la Figura N° 10 para los tramos 4 y 5 son cercanos, el riesgo para cada uno de ellos dista significativamente, siendo mayor el del tramo 4 con respecto al tramo 5. Este análisis permite visualizar el impacto que tiene la probabilidad de falla en la determinación del nivel de riesgo para los diferentes tramos evaluados, la cual no sólo varía la importancia de los tramos, sino

además disminuye significativamente el orden de magnitud del desembolso asociado a una falla.

Al comparar las probabilidades de falla globales por tramo evaluado expuestas en la Tabla N° 14 y las consecuencias asociadas ilustradas en la Figura N° 10 se evidencia que independientemente que un tramo presente una alta probabilidad de falla, si la consecuencia tiene un valor bajo el riesgo no necesariamente es elevado. Así, el tramo 6, quien presenta la probabilidad de falla más alta con un 45%, es uno de los tramos más seguros, es decir, con menor nivel de riesgo como se aprecia en la Figura N° 11 debido a la baja consecuencia asociada.

De igual forma, al comparar las Figuras N° 8 y N° 11 se observa que, independientemente que el tramo 3 tenga un tiempo de vida útil por encima del esperado, cuyo valor es el más alto con respecto al resto de los tramos, es quien presenta a su vez el mayor nivel de riesgo. Esto implica que este tramo probablemente pueda continuar operando sin necesidad de ser reemplazado, pero debe ser considerado prioridad por el nivel de riesgo que presenta para evitar que ocurran fallas que comprometan su operación.

Uno de los datos solicitados al custodio del gasoducto fue el riesgo máximo permitido, expresado en dólares, que estaría dispuesto a tolerar. Este valor permite identificar aquellos tramos que exhiben niveles de riesgo por encima del permitido, y así establecer una primera jerarquización de los mismos. El resultado obtenido se presenta en la Figura N° 12:

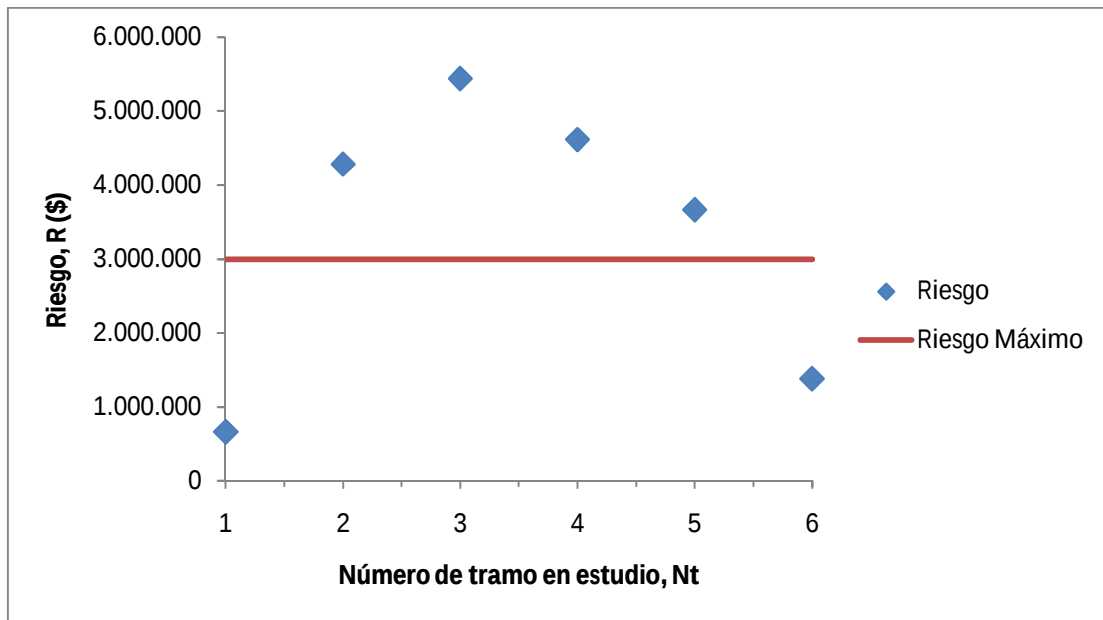


Figura N° 12. Riesgo por tramo de gasoducto evaluado y Riesgo Máximo Permitido

El valor de Riesgo Máximo Permitido por el custodio del gasoducto fue establecido en US\$ 3.000.000, y en la Figura N° 12 se observa claramente cómo 4 de los 6 tramos evaluados tienen niveles de riesgo por encima del valor permitido. Esto permite deducir que las acciones propuestas para mitigar el riesgo asociado no deben estar orientadas sólo al tramo 3, quien presenta el mayor nivel de riesgo, sino también para los tramos 2, 4 y 5. De igual manera, permite descartar los tramos 1 y 6, quienes tienen valores por debajo del riesgo permitido, cuya magnitud se aleja significativamente de este valor definido y se consideran de operación segura.

Este valor de Riesgo Máximo Permitido definido por el custodio no sólo ayuda en la identificación de los tramos que deben ser tratados con mayor cuidado para disminuir su nivel de riesgo y extender su vida útil, sino además permite estimar el esfuerzo necesario para llevar esos tramos a niveles de riesgo aceptados. Este valor se definió al aplicar la Ecuación 10 que expresa la diferencia entre el Riesgo Real y el Riesgo Máximo Permitido (ver Apéndices, Sección 11), y de forma cualitativa a

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

través una escala que determina si el esfuerzo necesario es alto, medio o bajo. La Tabla N° 17 a continuación expone el nivel de esfuerzo obtenido para cada tramo estudiado:

Tabla N° 17. Nivel de esfuerzo por tramo de gasoducto evaluado

Nro. Tramo, <i>Nt</i>	Nivel de Esfuerzo
1	Ninguno
2	Medio
3	Alto
4	Medio
5	Medio
6	Ninguno

La Tabla N° 17 expone cómo los tramos de gasoducto establecidos tienen niveles de esfuerzo diferentes. Se evidencia además que el tramo 3, cuyo nivel de riesgo es superior al del resto de los tramos evaluados, requiere un esfuerzo alto para poder disminuirlo y llevarlo hasta un valor tolerado por el custodio. Por su parte, para los tramos 2, 4 y 5 que también presentan niveles de riesgo por encima del Riesgo Máximo Permitido se necesita un esfuerzo medio que mitigue dichos niveles de riesgo estimados.

JERARQUIZACIÓN POR RIESGO

El análisis de los tramos de gasoducto evaluados por su nivel de riesgo y esfuerzo necesario para disminuirlo permitió jerarquizarlos, de forma decreciente, como se presenta en la Tabla N° 18:

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla N° 18. Jerarquización por riesgo de los tramos evaluados

Nro. Tramo, Nt	Riesgo [\$]	Nivel de Esfuerzo
3	\$5.439.179,82	Alto
4	\$4.615.001,47	Medio
2	\$4.284.229,39	Medio
5	\$3.666.306,87	Medio
6	\$1.379.285,40	Ninguno
1	\$662.618,94	Ninguno

La Tabla N° 18 jerarquiza los diferentes tramos del gasoducto evaluado de acuerdo al nivel de riesgo y al esfuerzo asociado para mitigarlo. De acuerdo a lo presentado, en la Tabla N° 18 se asigna la mayor prioridad al tramo 3 por tener el mayor nivel de riesgo y requerir un esfuerzo alto para llevarlo hasta un valor permitido por el custodio. Esto quiere decir que las acciones propuestas deben estar orientadas en primera instancia a corregir las causas que influyen en el riesgo asociado para este tramo.

También en la Tabla N° 18 se encuentran los tramos que presentan valores de riesgo superiores al permitido por el custodio, y que requieren un nivel de esfuerzo medio para lograr disminuirlo. Se puede apreciar que el tramo 4 exhibe un nivel de riesgo superior que el resto de los tramos de esfuerzo medio, lo cual implica que las acciones propuestas deben ir enfocadas inicialmente hacia este tramo.

Finalmente, la Tabla N° 18 evidencia que en efecto el tramo 1 es quien tiene menor nivel de riesgo, y no requiere de esfuerzo alguno al considerarse por debajo del Riesgo Máximo Permitido por el custodio. Ello implica que para este tramo, así como para el tramo 6 que exhibe condiciones similares de riesgo, no es necesario proponer acciones que incremente la seguridad operacional de los mismos.

ACCIONES PROPUESTAS

En base a la jerarquización de los tramos de gasoducto evaluados, se identificó que para el tramo 3 es necesario ejecutar una serie de acciones orientadas a mitigar el alto nivel de riesgo que presenta. Dichas acciones derivan de las condiciones en las que se presentan las variables críticas del factor de evaluación que mayor incidencia tiene sobre el riesgo del mismo. Es decir, es necesario estudiar los valores de probabilidad de falla por factor de evaluación y el porcentaje de confiabilidad de sus variables críticas para definirlas.

De acuerdo a lo expuesto en la Tabla N° 13, para el tramo 3 el mayor valor de probabilidad de falla está asociado a las acciones por terceros, con un valor del 47%. A su vez, las variables críticas exhiben valores de confiabilidad diferentes, como se aprecia en la Tabla N° 9, los cuales permiten identificar aquellas variables que comprometen significativamente la seguridad operacional del tramo. Así, se evidencia que la protección de la instalación no aporta en la confiabilidad del tramo, seguida de los planes de vigilancia, la señalización, la educación ciudadana, la actividad poblacional y finalmente la profundidad de la instalación, variable que tiene el mayor porcentaje de confiabilidad. De igual forma, se pueden estudiar el resto de los factores de evaluación y sus variables críticas, en la búsqueda de reducir su porcentaje de probabilidad de falla y mejorar el nivel de riesgo del tramo. Basado en ello, las acciones propuestas para mitigar el riesgo en el tramo 3 del gasoducto evaluado se presentan en la Tabla N° 19, en orden de importancia decreciente de acuerdo al factor de evaluación que tiene mayor incidencia en la probabilidad de falla del tramo 3:

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla N° 19. Acciones propuestas para el tramo de mayor riesgo y esfuerzo alto

Factor de evaluación	Acciones Propuestas
Por Terceros	• Construir la adecuada protección física que requiere el tramo. • Evaluar el impacto de la actividad poblacional para el tramo. • Aumentar la frecuencia de vigilancia de la instalación, realizándola quincenal o semanalmente.
Por Corrosión	• Realizar estudios que indiquen la presencia de bacterias en el suelo. • Evaluar la presencia de mecanismos de corrosión en el tramo. • Considerar el cambio en el tipo de revestimiento del tramo.
Por Diseño	• Estudiar los soportes que existan en el tramo, e incorporar aquellos que hayan sido removidos o se encuentren en malas condiciones. • Mitigar la reducción en el espesor nominal de la tubería mediante la disminución de la tasa de corrosión.
Por Inspección y Mantenimiento	• Establecer una frecuencia de inspección de suelos e implementarla. • Ejecutar las acciones críticas y moderadamente críticas del mantenimiento con una frecuencia menor o igual a 6 meses.

Así mismo, se definieron acciones a ejecutar para los diferentes tramos que requieren un nivel de esfuerzo medio para mitigar su riesgo asociado, las cuales se presentan en la Tabla N° 20 a continuación:

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla N° 20. Acciones propuestas para los tramos de esfuerzo medio

Nro. Tramo	Factor de evaluación	Acciones Propuestas
4	Por Inspección y Mantenimiento	- Realizar inspecciones instrumentadas internas. - Ejecutar el levantamiento de potenciales en un periodo menor o igual a 6 meses.
	Por Corrosión	- Evaluar el impacto de estructuras metálicas foráneas cerca del tramo. - Revisar el sistema de protección catódica.
	Por Terceros	- Incrementar la frecuencia de vigilancia de la instalación, realizándola quincenal o semanalmente. - Instalar la señalización adecuada.
	Por Diseño	- Ejecutar una nueva prueba hidrostática para el tramo. - Mitigar la reducción en el espesor nominal de la tubería mediante la disminución de la tasa de corrosión.
2	Por Inspección y Mantenimiento	- Incrementar la frecuencia de inspección instrumentada interna. - Incrementar la frecuencia de inspección del suelo.
	Por Corrosión	- Evaluar la presencia de mecanismos de corrosión en el tramo. - Evaluar el impacto de estructuras metálicas foráneas cerca del tramo.
	Por Terceros	- Evaluar el impacto de la actividad poblacional para el tramo. - Incrementar la frecuencia de vigilancia de la instalación, realizándola quincenal o semanalmente.
	Por Diseño	- Mitigar la reducción en el espesor nominal de la tubería mediante la disminución de la tasa de corrosión. - Realizar estudios para los soportes del tramo.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tabla N° 20. (Continuación)

Nro. Tramo	Factor de Evaluación	Acciones Propuestas
5	Por Terceros	• Instalar la señalización adecuada. • Realizar jornadas educativas para el público relacionadas al resguardo del tramo.
	Por Corrosión	• Revisar el sistema de protección catódica. • Evaluar la resistividad y pH del suelo donde se encuentra el tramo.

Junto a las acciones establecidas para mitigar el nivel de riesgo de los tramos que lo ameritan, expuestas en las Tablas N° 19 y 20, se propone realizar la evaluación de integridad del gasoducto dentro de un (1) año después de desarrollado este estudio diagnóstico, para conocer si efectivamente las acciones propuestas lograron afectar positivamente la confiabilidad de los mismos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones del presente Trabajo Especial de Grado, en función de los objetivos propuestos:

- Las variables críticas identificadas responden al criterio de expertos, y pueden ser aplicadas para cualquier tubería de acero que transporte gases, líquidos o mezclas multifásicas.
- Las Matrices de Valoración Binaria permiten estimar los pesos ponderados de las variables críticas por factores de evaluación definidos.
- Los pesos ponderados de las variables críticas son datos estadísticos que permiten ser aplicables a cualquier tubería de acero.
- Las condiciones definidas para cada una de las variables críticas abarcan gran parte de las situaciones que se presentan en la realidad de las tuberías.
- Las condiciones de las variables críticas por factor de evaluación es particular para cada tramo estudiado.
- La evaluación de los tramos es individual y propia de cada uno.
- La confiabilidad de las variables críticas depende de las condiciones en las que éstas se presenten para el tramo evaluado.
- La protección de la instalación es la variable crítica por terceros de mayor porcentaje de confiabilidad para la mayoría de los tramos evaluados, seguida de la protección de la instalación.
- Las variables críticas inciden en distinta medida sobre la confiabilidad de los tramos estudiados.
- El factor de evaluación por diseño es el que presenta mayor porcentaje de confiabilidad, mientras que el factor de evaluación por terceros exhibe el menor valor de confiabilidad para la mayoría de los tramos evaluados.

- Los tramos 2 y 3 evaluados presentan un tiempo de vida útil por encima del esperado, mientras que el resto de los demás tramos se encuentran por debajo de este valor.
- El segundo tramo presenta el mayor porcentaje de confiabilidad global, mientras que el sexto tramo tiene la menor confiabilidad global.
- La probabilidad de falla está relacionada directamente a la confiabilidad.
- El factor de evaluación que menor porcentaje de probabilidad de falla exhibe es el diseño, mientras que terceros e inspección y mantenimiento son quienes presentan el mayor porcentaje para la mayoría de los tramos estudiados.
- El sexto tramo presenta el mayor valor de probabilidad de falla, mientras que el segundo tramo, el menor porcentaje estimado.
- La consecuencia global del tercer tramo es la más elevada, seguida de la correspondiente al segundo tramo, mientras que el menor valor de consecuencia global pertenece al primer tramo.
- El nivel de riesgo más alto corresponde al tercer tramo de gasoducto evaluado, mientras que el primero de estos presenta el menor nivel de riesgo.
- Desde el segundo al quinto tramo presentan niveles de riesgo por encima del Riesgo Máximo Permitido.
- Los tramos con valores de riesgo por encima del Riesgo Máximo Permitido requieren niveles de esfuerzo medio y alto.
- El tercer tramo requiere un alto nivel de esfuerzo, mientras que el segundo, cuarto y quinto tramo sólo necesitan un nivel de esfuerzo medio.
- La jerarquización de los tramos depende del valor de riesgo asociado y el nivel de esfuerzo requerido.

- La evaluación y resultados del Modelo para la Estimación del Riesgo son obtenidos en función del nivel de experiencia de los especialistas que identificaron y ponderaron las variables críticas consideradas.
- Las acciones propuestas son definidas para los tramos que presentan un nivel de esfuerzo medio o alto, en base a los factores de evaluación que más comprometen su confiabilidad y a sus variables críticas.
- Las acciones propuestas se basan en las condiciones de mayor seguridad en las que pueden presentarse las variables críticas con mayor incidencia en la confiabilidad del tramo evaluado.
- Por presentar el valor de riesgo más elevado y el nivel de esfuerzo más alto, las acciones propuestas para el tercer tramo evaluado deben ser necesariamente ejecutadas de forma prioritaria.

**CAPÍTULO VI
RECOMENDACIONES**

Este capítulo contempla las recomendaciones propuestas para la optimización o continuación del presente Trabajo Especial de Grado:

- Realizar una consulta más amplia para redefinir las variables críticas por factor de evaluación establecidas.
- Incrementar el detalle en las condiciones definidas para cada variable crítica.
- Definir la severidad de las consecuencias como un compendio entre el desembolso máximo y el(los) evento(s) que podrían presentarse para cada ámbito definido.
- Definir la ponderación de los factores de evaluación mediante la consulta a expertos, y no como datos estadísticos internacionales.
- Realizar un estudio con mayor detalle de las variables críticas que comprometen significativamente la confiabilidad de las tuberías evaluadas.
- Establecer una matriz de criticidad en base al esfuerzo determinado para las tuberías evaluadas.
- Orientar las acciones propuestas no sólo a optimizar el valor de la probabilidad de falla, sino también considerar la consecuencia.

CAPÍTULO VII
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSG Consulting de Venezuela, S.A. (2010). *Sistema de Gestión de Integridad*. Caracas.

American Institute of Chemical Engineers. (1999). *Guidelines for consequence analysis of chemical releases*. Nueva York, Estados Unidos: Library of Congress Cataloging-in Publication Data.

American Petroleum Institute. (2009). *Risk-Based Inspection*.

ASME B31-8. (2003). *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*. Nueva York, Estados Unidos: The American Society of Mechanical Engineers.

Bilurbina, L., & Liesa, F. y. (2003). *Corrosión y protección*. Barcelona, España: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL.

Centro Internacional de Capacitación y Soporte. (s.f.). *Método de Priorización de Variables basado en Matrices*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2010, de <http://www.planificacion.upla.edu.pe/portal/images/REFLEXIONES/METODOPARAPONDERARGEYCYT%28conf%29.pdf>

Construction Industry Institute. (1999). *Design for Maintainability Guidebook* (1ra ed.). Estados Unidos.

Davis, J. (2000). *Corrosion. Understanding the basics*. Estados Unidos: ASM Internacional.

Department Of Transportation. (2011). *U.S. Department Of Transportation*. Recuperado el 10 de Marzo de 2011, de <http://www.dot.gov/>

CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gómez, J., & Mata, J. (2008). *Diseño, Montaje y Puesta a punto de un sistema a flujo continuo para evaluar el efecto en condiciones reales controladas de incrustantes y corrosivos*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Grajales, T. (s.f.). *Tipos de Investigación*. Recuperado el 18 de octubre de 2010, de <http://tgrajales.net/investipos.pdf>

Hermoso, V. (2008). *Desarrollo de la Ingeniería Conceptual y Básica para la disposición de compuestos BTEX emitidos en la unidad de regeneración de glicol de la planta de refrigeración San Joaquín, ubicada en el Estado Anzoátegui*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Mangonon, P. (2001). *Ciencia de los materiales. Selección y Diseño*. México: Pearson Educación.

Martínez, O. (2003). *Gerencia de la Incertidumbre en el Cálculo de las Presiones Máximas de Operación en Áreas Corroídas de Tuberías*. Trabajo Especial de Maestría, Universidad Simón Bolívar, Caracas.

PDVSA Gas. (2000). *Matriz de Riesgo Mínimo*. Gerencia de Servicios Operacionales.

PDVSA, IR-S-02. (2004). *Manual de Ingeniería de Riesgos*. Caracas, Venezuela.

PDVSA, IR-S-15. (2004). *Standard Guidelines for Pipelines Systems Risk Analysis*.

Peabody, A. (2001). *Control of pipeline corrosion*. (2da. ed.). Houston, Texas: NACE Press.

Rumiche, F., & Indacochea, E. (2006). *Estudios de Caso de Fallas y Accidentes en Gasoductos y Oleoductos*. University Of Illinois, Chicago, Estados Unidos.

CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Schweitzer, P. (1989). *Corrosion and Corrosion Protection Handbook*. (2da. ed.). Nueva York, Estados Unidos: Marcel Dekker Inc.

Silva, A. (2007). *Gerencia de Proyectos III*. (3ra. ed.). Caracas: Universidad Metropolitana.

Textos Científicos. (01 de Marzo de 2008). Recuperado el 05 de Agosto de 2010, de www.textoscientificos.com

Urbaz, C. (2009). *Estudio integral de corrosión en los pozos petroleros intervenidos en la campaña 2007-2008 en el campo Uracoa, empresa mixta petrodelta*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Wiley, J. (2010). *Guidelines for Process Safety Metrics*. Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.

CAPÍTULO VIII

APÉNDICES

CÁLCULOS TIPO

1. Peso ponderado en la Matriz de Valoración Binaria para variables críticas

$$\text{Peso ponderado } A = \frac{\text{Total fila } A}{\text{Total matriz}} * 100$$

Donde:

Peso ponderado A: porcentaje de la variable crítica A evaluada en la Matriz de Valoración Binaria (%).

Total fila A: puntaje total de la fila A (puntos).

Total matriz: puntaje obtenido de la totalización de las filas (puntos).

Sustituyendo los valores correspondientes a la variable crítica “Profundidad de la instalación (PInst)” expuestos en la Tabla N° 5, se obtiene

$$\text{Peso ponderado "PInst"} = \frac{3}{15} * 100$$

$$\text{Peso ponderado "PInst"} = 20\%$$

2. Confiabilidad de variables críticas

$$Ci = Ai * Xi$$

Donde:

Ci: Confiabilidad de la variable crítica (puntos).

Ai: Ponderación de la variable crítica obtenida de las Matrices de Valoración Binaria.

Xi: Peso por condición de la variable crítica por tramo de tubería (puntos).

Sustituyendo los valores de peso ponderado correspondiente a la variable crítica “Profundidad de la instalación” expuesto en la Tabla N° 6, y la condición y peso por condición presentados en las Tablas N° 7 y N° 8 para el primer tramo evaluado, se obtiene

$$C_{PI_{nst}} = 0,27 * 5$$

$$C_{PI_{nst}} = 1,35 \text{ ptos}$$

3. Confiabilidad máxima por factor de evaluación

$$C_{m\acute{a}x} = \sum_i (A_i * C_{i_{m\acute{a}x}})$$

Donde:

$C_{m\acute{a}x}$: Confiabilidad máxima por factor de evaluación (puntos).

$C_{i_{m\acute{a}x}}$: Confiabilidad máxima de la variable crítica (puntos).

Empleando los valores de confiabilidad máxima de las variables críticas del factor de evaluación por terceros y sus respectivos pesos ponderados, obtenidos de las Tablas N° 6 y N° 7 respectivamente, se obtiene

$$\begin{aligned} C_{m\acute{a}x \text{ terceros}} &= (0,27 * 10) + (0,13 * 15) + (0,13 * 15) + (0,27 * 10) \\ &\quad + (0,07 * 10) + (0,13 * 10) \end{aligned}$$

$$C_{m\acute{a}x \text{ terceros}} = 11,3 \text{ pts}$$

4. Porcentaje de Confiabilidad de variables críticas

$$\%Ci = \frac{Ci}{C_{m\acute{a}x}} * 100$$

Donde:

%Ci: Porcentaje de confiabilidad de la variable crítica (%).

Sustituyendo la confiabilidad de la variable crítica “Profundidad de la instalación (PInst)” y la confiabilidad máxima del factor de evaluación por terceros para el primer tramo evaluado, se obtiene

$$\begin{aligned}\%C_{PInst} &= \frac{1,35}{11,3} * 100 \\ \%C_{PInst} &= 24\%\end{aligned}$$

5. Porcentaje de Confiabilidad por factor de evaluación

$$\%C_{FE} = \frac{\sum_i (A_i * C_i)}{C_{m\acute{a}x}}$$

Donde:

%C_{FE}: Porcentaje de confiabilidad por factor de evaluación (%).

Sustituyendo los valores de confiabilidad para las variables críticas del factor de evaluación por terceros para el primer tramo evaluado, junto a sus pesos ponderados presentados en la Tabla N° 6, y la confiabilidad máxima para dicho factor de evaluación, se obtiene

$$\begin{aligned}\%C_{terceros} &= \frac{1}{11,3} ((5 * 0,27) + (10 * 0,13) + (10 * 0,27) + (5 * 0,07)) \\ \%C_{terceros} &= 50\%\end{aligned}$$

6. Confiabilidad Global por tubería

$$\%C_G = \sum_i (B_{FE} * \%C_{FE})$$

Donde:

$\%C_G$: Porcentaje de Confiabilidad Global (%).

B_{FE} : Peso ponderado del factor de evaluación.

Sustituyendo los valores de Confiabilidad por factor de evaluación para el primer tramo evaluado junto a los pesos ponderados por factor de evaluación presentes en las Tablas N° 10 y N° 11 respectivamente, se obtiene

$$\begin{aligned} \%C_G &= ((0,35 * 50) + (0,30 * 68) + (0,20 * 71) + (0,15 * 52)) \\ \%C_G &= 60\% \end{aligned}$$

7. Probabilidad de falla por factor de evaluación

$$\%Pf_{FE} = 100 - \%C_{FE}$$

Donde:

$\%Pf_{FE}$: Probabilidad de falla por factor de evaluación (%).

Sustituyendo el valor del porcentaje de Confiabilidad para el factor de evaluación por corrosión obtenido en el primer tramo estudiado, se tiene

$$\begin{aligned} \%Pf_{corrosión} &= 100 - 68 \\ \%Pf_{corrosión} &= 32\% \end{aligned}$$

8. Probabilidad de falla Global por tubería

$$\%Pf_G = 100 - \%C_G$$

Donde:

$\%Pf_G$: Probabilidad de falla Global (%).

Sustituyendo el valor de Confiabilidad Global para el primer tramo evaluado expuesto en la Tabla N° 12, se obtiene

$$\%Pf_G = 100 - 60$$

$$\%Pf_G = 40\%$$

9. Consecuencia por tubería

$$C = \sum D_{m\acute{a}x}$$

Donde:

C: Consecuencia (\$).

$D_{m\acute{a}x}$: Desembolso máximo de la severidad por ámbito (\$).

Sumando los desembolsos máximos asociados a las severidades seleccionadas para el primer tramo evaluado de acuerdo a lo presentado en la Tabla N° 16, se obtiene

$$C = (100.000 + 50.000 + 500.000 + 500.000 + 500.000)\$$$

$$C = 1.650.000\$$$

10. Riesgo por tubería

$$R = \%P_{fG} * C$$

Donde:

R: Riesgo (\$).

Sustituyendo los valores de probabilidad de falla global y consecuencia obtenidos para el primer tramo evaluado, se tiene que

$$R = 40\% * 1.650.000\$$$

$$R = 662.618,94\$$$

11. Esfuerzo por tubería

$$E = R - R_{m\acute{a}x}$$

Donde:

E: Esfuerzo (\$).

R_{máx}: Riesgo Máximo Permitido (\$).

Sustituyendo el valor de Riesgo Máximo Permitido y el Riesgo obtenido para el tercer tramo evaluado mostrado en la Figura N° 7, se tiene

$$E = (5.439.179,82 - 3.000.000)\$$$

$$E = 2.439.179,82\$$$

CAPÍTULO IX

GLOSARIO

En este capítulo se presentan las definiciones de algunos términos relevantes empleados durante el desarrollo del Trabajo Especial de Grado.

1. **Ciclo de vida:** etapas por las que atraviesan las tuberías desde su nacimiento hasta su muerte, e incluye la concepción, diseño, adquisición, implementación, operación, mantenimiento, decomisionado y disposición.

Fuente: Guidelines for Process Safety Metrics (Wiley, Guidelines for Process Safety Metrics., 2010).

2. **Confiabilidad:** probabilidad de la tubería que expresa su capacidad de desempeñar una función requerida bajo condiciones establecidas por un periodo de tiempo o para una demanda definida.

Fuente: Guidelines for Process Safety Metrics (Wiley, Guidelines for Process Safety Metrics., 2010).

3. **Corrosión:** reacción química o electroquímica entre el material, usualmente un metal, y el ambiente, tal que produce deterioro en el mismo y sus propiedades.

Fuente: Corrosion. Understanding the Basics (Davis, 2000).

4. **Corrosión Atmosférica:** proceso de corrosión que ocurre bajo condiciones atmosféricas donde el hierro se oxida. Apreciable en procesos con altas temperaturas donde aceros al carbono han sido empleados sin recubrimientos protectores.

Fuente: American Petroleum Institute (American Petroleum Institute, 2009).

- 5. Corrosión Externa:** define el efecto generado por la interacción de la tubería con el suelo, y aplica sin importar la condición de tendido que presente la tubería.

Fuente: Matriz de Riesgo Mínimo (PDVSA Gas, 2000).

- 6. Corrosión Interna:** evalúa la dinámica entre fluido que se desplaza dentro de la tubería con el material y las características propias de la misma.

Fuente: Matriz de Riesgo Mínimo (PDVSA Gas, 2000).

- 7. Consecuencia:** medida de los efectos esperados resultado de un incidente.

Fuente: Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases (American Institute of Chemical Engineers, 1999).

- 8. Custodio:** entidad individual, asociación, corporación, agencia pública o cualquier otro tipo de entidad encargada de operar las instalaciones de transporte y distribución del fluido.

Fuente: Gas Transmission and Distribution Piping Systems (ASME B31-8, 2003).

- 9. Diámetro nominal externo:** valor de diámetro externo del tubo de acuerdo a como fue producido o especificado, expresado en pulgadas.

Fuente: Gas Transmission and Distribution Piping Systems (ASME B31-8, 2003).

- 10. Esfuerzo mínimo de fluencia:** mínimo esfuerzo en el cual un material produce una elongación total específica bajo una carga. Su valor es una especificación bajo la cual se adquiere de la manufactura, expresado en libras por centímetro cuadrado.

Fuente: Gas Transmission and Distribution Piping Systems (ASME B31-8, 2003).

- 11. Espesor nominal de pared:** espesor de pared empleado durante el diseño, proveniente de valores estándar presente en las Normas ASME.

Fuente: Gas Transmission and Distribution Piping Systems (ASME B31-8, 2003).

- 12. Fractura por estrés (*Stress Corrosion Cracking*):** acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio corrosivo, la cual da como resultado, en algunos casos, la fractura de una aleación metálica.

Fuente: Diseño, Montaje y Puesta a punto de un sistema de flujo continuo para evaluar el efecto en condiciones reales controladas de incrustantes y corrosivos (Gómez & Mata, 2008).

- 13. Gas:** cualquier gas o mezcla de gases adecuados para combustible doméstico o industrial, transmitido o distribuido al usuario a través de un sistema de tuberías. Comúnmente se consideran el gas natural, gas manufacturado y gases licuados de petróleo distribuidos como vapor.

Fuente: Gas Transmission and Distribution Piping Systems (ASME B31-8, 2003).

- 14. Instalación:** locación física donde se encuentran las tuberías, y donde se desarrollan las actividades del sistema de gerencia.

Fuente: Guidelines for Process Safety Metrics (Wiley, Guidelines for Process Safety Metrics, 2010).

- 15. Integridad de tuberías:** actividades que ayudan a garantizar que las tuberías estén debidamente diseñadas, instaladas de acuerdo a las especificaciones y cumplan su propósito operacional adecuadamente durante su ciclo de vida.

Fuente: Guidelines for Process Safety Metrics (Wiley, Guidelines for Process Safety Metrics, 2010).

- 16. Mantenimiento:** todas las acciones necesarias para retener un sistema o producto dentro o hacia un estado operacional deseado, como consecuencia del diseño.

Fuente: Desing for Maintainability Guidebook (Construction Industry Institute, 1999).

- 17. Probabilidad de falla:** número de veces que ocurre un evento durante un periodo de tiempo establecido, y su valor debe encontrarse en el intervalo 0-1.

Fuente: Guidelines for Consecuencia Analysis of Chemical Releases (American Institute of Chemical Engineers, 1999).

- 18. Protección Catódica:** técnica para reducir la corrosión de la superficie de un metal, convirtiendo dicha superficie el cátodo de una celda electroquímica.

Fuente: Control of Pipeline Corrosion (Peabody, 2001).

- 19. Prueba Hidrostática:** prueba realizada para comprobar que la tubería puede soportar la presión adecuada.

Fuente: Los laberintos de la Tierra. Gasoductos y Sociedad en el Oriente Boliviano (Correa, Imaña, & Añez, 2003).

- 20. Recubrimiento:** composición líquida o masilla que, luego de aplicada sobre una superficie, se convierte en una película adherida protectora, decorativa o funcional. Su objetivo es aislar el metal del medio corrosivo.

Fuente: Control of Pipeline Corrosion (Peabody, 2001).

- 21. Revestimiento:** recubrimiento o hoja de material adherido a o en contacto directo con la superficie interior de la tubería empleado para protegerla contra la corrosión por interacción con el fluido que transporta, o para evitar la contaminación del contenido de la misma del material de la tubería.

Fuente: Control of Pipeline Corrosion (Peabody, 2001).

- 22. Riesgo:** probabilidad de que suceda un determinado peligro potencial o situación física que puede provocar daños a la vida, a los equipos o al medio.

Fuente: Análisis del riesgo en instalaciones industriales (Casal Fábrega, Montiel, Planas, & Vélchez, 1999).

Medida de afectación a las personas, daño ambiental o pérdidas económicas en términos de la posibilidad de que ocurra el incidente y la magnitud de pérdida o daño.

Fuente: Guidelines for Consecuencia Analysis of Chemical Releases (American Institute of Chemical Engineers, 1999).

- 23. Tolerabilidad del riesgo:** asociada a la percepción de la severidad de las consecuencias potenciales de un accidente, especialmente cuando afecta al público en general. A pesar de ser un tema subjetivo, es necesario fijar criterios de tolerancia de riesgos que permitan evaluar el significado de los valores de riesgo y formular las recomendaciones necesarias para mitigarlo.

Fuente: Manual de Ingeniería de Riesgos (PDVSA, IR-S-02, 2004).

- 24. Tubería:** estructura por donde se desplaza el fluido en una instalación durante su transporte, incluyendo tubos, válvulas, accesorios, bridas, reguladores, recipientes a presión, amortiguadores de pulsaciones, válvulas de alivio y cualquier otro elemento unido al tubo.

Fuente: Gas Transmission and Distribution Piping Systems (ASME B31-8, 2003).

- 25. Tubo:** producto tubular o cilíndrico manufacturado para la venta como un elemento para la producción, utilizado para transportar o transmitir fluidos a presión.

Fuente: Gas Transmission and Distribution Piping Systems (ASME B31-8, 2003).

- 26. Variables críticas:** aquellas variables que influyen de manera significativa en el desempeño de la tubería, y se manifiesta normalmente como descontento o insatisfacción por parte del cliente.

Fuente: Método de Priorización de Variables basado en Matrices (Centro Internacional de Capacitación y Soporte, s.f.).