



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE PREDICCIÓN DE
TIEMPOS DE INSPECCIÓN EN LA PROGRAMACIÓN DEL
CONTROL DE MEDICIÓN DE ESPESORES EN LÍNEAS Y EQUIPOS
DE PROCESO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO
P R E S E N T A :**

RODOLFO ROJAS BALBUENA



MÉXICO, D.F.

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO

Presidente	Prof. Gerardo Rafael Bazan y Navarrete.
Vocal	Prof. Lucila Cecilia Méndez Chávez.
Secretario	Prof. Modesto Javier Cruz Gómez.
1 ^{er} Suplente	Prof. Genovevo Silva Pichardo.
2 ^{do} Suplente	Prof. Luis Mendoza González.

SITIO EN DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA

Nivel 4, Ala norte
Torre de Ingeniería, UNAM.

Asesor



Dr. M. Javier Cruz Gómez.

Supervisor Técnico



M. en I. Luis Fernando Pérez Lara.

Sustentante



Rodolfo Rojas Balbuena.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por prestarme vida y salud para la culminación de mi carrera.

A mis padres Fidelina y Rodolfo por darme la vida, por haber confiado en mi, por haberme apoyado y por darme el mejor regalo que pudieron otorgarme, la oportunidad de terminar mi carrera. Gracias mamá.

A mis hermanos Carlos, Julisa, Maritza, Sonia y Lalo gracias por estar conmigo tanto en las buenas como en las malas, gracias por su apoyo y sobretodo por el cariño que me siempre me han mostrado. Ésta carrera es la culminación del esfuerzo de todos ustedes.

A mis amigos Víctor, César y Joel por estar conmigo en todo momento, por compartir horas de estudio y de diversión.

A Lucy Altamirano por compartir este tiempo de tu vida a mi lado, llegaste a darle alegría a mi vida.

Al doctor M. Javier Cruz Gómez por darme la oportunidad de trabajar con él y con su grupo en la realización de este trabajo.

Al M. en I. Luis Fernando Pérez Lara por su valiosa asesoría para la realización de la presente tesis.

A mis compañeros del laboratorio 212 y de la torre de ingeniería Erick, Vicente, Javier, Mónica, Néstor, Alma, Alejandro, Lupe, Nash y Juan.



ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABLAS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	II
ABREVIATURAS	III
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	4
1.1.1 Objetivo general	4
1.1.2 Objetivos particulares	4
1.2 Alcance del proyecto	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Origen del problema	7
2.2 Desgaste de tuberías y equipos de proceso	8
2.3 Abrasión	9
2.4 Corrosión	9
2.4.1 Definición	9
2.4.2 Tipos de corrosión	10
2.4.2.1 Con base en la morfología del ataque	10
2.4.2.2 Con base al medio atacante	12
2.4.2.3 Por acciones físicas o químicas	13
2.4.2.4 En base a los mecanismos de reacción	14
2.4.3 Control de la corrosión	15
2.4.3.1 Selección de materiales	15
2.4.3.2 Recubrimientos	16
2.4.3.3 Diseño	18
2.4.3.4 Alteración por el entorno	19
2.4.3.5 Protección catódica y anódica	20



2.5 Métodos para inspeccionar tuberías	22
2.5.1 Inspección visual	22
2.5.2 Líquidos penetrantes	23
2.5.3 Partículas magnéticas	27
2.5.4 Radiografía	28
2.5.5 Ultrasonido	29
2.6 Estadística descriptiva	31
2.6.1 Medidas de posición relativa	31
2.6.1.1 Cuartiles y percentiles	31
2.6.1.2 Posición relativa mediante unidades de desviación estándar	33
2.6.2 Métodos para detectar datos atípicos dentro de un grupo de valores	34
2.6.2.1 Unidades de desviación estándar	34
2.6.2.2 Gráfica de caja o de cuadro	35
CAPITULO III. TRABAJO EN CAMPO	37
3.1 Descripción de la Planta de Alquiler	38
3.2 Procedimiento para la inspección de espesores	43
3.2.1 Planeación	43
3.2.2 Medición en campo	43
3.2.3 Análisis estadístico posterior a la medición	45
3.2.4 Generación del reporte	48
3.3 Metodología propuesta para determinar y dar tratamiento a los puntos atípicos que resultan durante las inspecciones	48
3.4 Ejemplo de aplicación	51
3.4.1 Consideraciones realizadas	52
3.4.2 Análisis estadístico posterior a la inspección	53
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	61
4.1 Análisis de resultados	64
4.2 Beneficios económicos de un buen análisis estadístico en las inspecciones de espesores	67



CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
5.1 Conclusiones	71
5.2 Recomendaciones	72
ANEXOS	74
Anexo A. Dibujo isométrico de la UC-ALK-039	74
Anexo B. Dibujo isométrico de la UC-ALK-025	76
Anexo C. Historial de registro de medición de espesores de la UC-ALK-039	79
Anexo D. Historial de registro de medición de espesores de la UC-ALK-025	81
Anexo E. Memoria de cálculo del análisis estadístico realizado a la UC-ALK-025	92
BIBLIOGRAFÍA	95



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Valores estadísticos de la UC-ALK-039 de la inspección realizada en Mayo-05.	54
Tabla 3.2	Valores estadísticos de la UC-ALK-025 de la inspección realizada en Enero-05 (tubería de 8 pulgadas).	55
Tabla 3.3	Valores estadísticos de la UC-ALK-025 de la inspección realizada en Enero-05 (tubería de 2 pulgadas).	56
Tabla 3.4	Valores estadísticos de la UC-ALK-025 de la inspección realizada en Enero-05 (tubería de 1.5 pulgadas).	57
Tabla 3.5	Puntos críticos de la UC-ALK-039 en la inspección de Mayo-2005.	58
Tabla 3.6	Puntos críticos de la UC-ALK-025 en la inspección de Mayo-2005 para el diámetro de 8 pulgadas.	59
Tabla 3.7	Puntos críticos de la UC-ALK-025 en la inspección de Mayo-2005 para el diámetro de 2 pulgadas.	59
Tabla 3.8	Puntos críticos de la UC-ALK-025 en la inspección de Mayo-2005 para el diámetro de 1.5 pulgadas.	60
Tabla 4.1	Fecha de próxima inspección de espesores mediante la metodología actual para las unidades de control 39 y 25.	64
Tabla 4.2	Fecha de próxima inspección de espesores de las unidades de control 39 y 25 mediante la metodología propuesta.	65
Tabla 4.3	Desglose por diámetros de la última inspección de la UC-ALK-025.	66
Tabla 4.4	Comparación de los costos estimados de las dos metodologías.	69



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Proceso de inspección mediante líquidos penetrantes.	23
Figura 2.2	Ejemplo de una gráfica de caja.	36
Figura 3.1	Diagrama de bloques de la Planta de Alquiler.	41
Figura 3.2	Diagrama de flujo de la Planta de Alquiler.	42
Figura 3.3	Aparato de medición ultrasónico DMS-2.	44
Figura 3.4	Localización de puntos de medición en tubería y accesorios.	45
Figura 3.5	Dispersión de las lecturas tomadas de la UC-ALK-039 en la inspección realizada en Mayo-05.	54
Figura 3.6	Dispersión de las lecturas de 8 pulgadas tomadas de la UC-ALK-025 en la inspección realizada en Enero-05.	55
Figura 3.7	Dispersión de las lecturas de 2 pulgadas tomadas de la UC-ALK-025 en la inspección realizada en Enero-05.	56
Figura 3.8	Dispersión de las lecturas de 1.5 pulgadas tomadas de la UC-ALK-025 en la inspección realizada en Enero-05.	57
Figura 4.1	Distribución de las velocidades de desgaste en la última inspección de la UC-ALK-039.	63
Figura 4.2	Distribución de las velocidades de desgaste en la última inspección de la UC-ALK-025.	63



ABREVIATURAS

AICHE	American Institute of Chemical Engineers (Instituto Americano de Ingenieros Químicos).
API	American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo).
ASA's	Aceites Solubles en Ácido.
ASME	American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).
EO	Extreme Outliers (Puntos extremadamente críticos).
FPME	Fecha de Próxima Medición de Espesores.
FRP	Fecha de Retiro Probable.
GPASI	Gerencia de Protección Ambiental y Seguridad Industrial.
HF	Ácido Fluorhídrico.
Lr	Límite de retiro.
MHz	Megahertz.
MO	Mild Outliers (Puntos medianamente críticos).
MTBE	Metil-Terbutil-Éter.
PEMEX	Petróleos Mexicanos.
PND	Prácticas No Destructivas.
SIMECELE	Sistema Integral de MEdición y Control de Espesores en Líneas y Equipos.
SCC	Stress Corrosion Cracking (Rotura debida a la corrosión por esfuerzo).



UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México.
UC	Unidad de Control.
VUE	Vida Útil Estimada.



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN





1. INTRODUCCIÓN

La actividad industrial, particularmente la de refinación del petróleo es de gran importancia y en muchos casos necesaria en el mundo actual, sin embargo dicha actividad también conlleva riesgos y así lo demuestran los innumerables accidentes suscitados desde sus inicios. El problema se agrava debido a las sustancias y los volúmenes que se manejan, este tipo de cuestiones hacen que esté clasificada como una actividad de alto riesgo.

Existen diversos factores que pueden ocasionar desviaciones sobre las condiciones de diseño de un sistema. El más importante de ellos es la corrosión, éste fenómeno representa para cualquier industria aproximadamente el 80% de las fallas ocurridas en las estaciones de producción y transporte.

Este problema se acentúa ya que los hidrocarburos que se procesan contienen distintos agentes corrosivos, tales como: H_2S , CO_2 , O_2 y bacterias, los cuales en presencia de agua causan severos daños a las tuberías que los transportan y a los equipos de proceso con los que se encuentran en contacto, este problema aunado al desgaste propio debido al transporte del fluido, en muchos casos a temperaturas y presiones elevadas, genera una disminución de espesores en las paredes del material, lo cual da como resultado un decrecimiento en la vida útil de operación de las tuberías.

En lo que se refiere a seguridad PEMEX es una empresa que siempre ha estado comprometida con la seguridad de las personas y con el cuidado del medio ambiente, por tal motivo se ha dado a la tarea de minimizar los riesgos inherentes a la operación de sus instalaciones, es por ello que se han ido aumentando los recursos destinados para tal fin, pese a ello se han seguido suscitando diversos accidentes dentro y fuera de dichas instalaciones, lo que ocasiona por un lado grandes pérdidas cuantificables y por el otro pérdidas no cuantificables como lo es el daño tanto a personas como al medio ambiente, que en muchos casos son irreparables.



Uno de los proyectos encaminados a la mejora de la seguridad es el que PEMEX-Refinación destinó a la UNAM a través de la Facultad de Química. Dicho proyecto consistió en la mejora de los procedimientos de inspección y control de mediciones de espesores en tuberías y equipos de proceso, debido a la necesidad de contar con un sistema el cual apoyara en el procedimiento de inspeccionar espesores, desde la toma de la medición hasta la realización de los cálculos posteriores.

Como ayuda en el procedimiento de inspección de espesores se creó el Sistema Integral de MEDición y Control de Espesores en Líneas y Equipos (SIMECELE), el cual es un desarrollo tecnológico que tiene por objetivo incrementar la efectividad y eficiencia de los procesos de inspección técnica mediante la integración de tecnologías de punta.

En lo que respecta a la inspección de espesores, asociaciones como la API (*American Petroleum Institute*) y el AICHE (*American Institute of Chemical Engineers*) han desarrollado una serie de métodos para llevar a cabo esta tarea en instalaciones de proceso químico. En estos procedimientos se propone la forma en la cual se debe organizar el proceso para realizar la inspección, así como el uso de ciertos parámetros tales como el espesor mínimo para el retiro de una tubería, tiempo de vida remanente y como obtener la fecha recomendable para la siguiente revisión.

PEMEX Refinación ha desarrollado una normatividad para llevar a cabo el proceso para la inspección en todas sus instalaciones, la normatividad está basada en las recomendaciones internacionales y en su propia experiencia.

Lo que plantea la normatividad es que para analizar el desgaste que sufren las tuberías en la Refinería, la totalidad de líneas se deben dividir en unidades de control, que son secciones de tubería que poseen una velocidad de corrosión más o menos homogénea, cada unidad de control contiene niveles de medición (un nivel de medición es el conjunto de posiciones en donde se realiza propiamente la medición), cada nivel de tubería cuenta con 4 posiciones de medición que pueden ser norte, sur, este, oeste, arriba, abajo y éstas se asignan dependiendo la ubicación de la tubería. Ver figura 3.4 “Localización de puntos de medición en tubería y accesorios”.



Las inspecciones tienen como finalidad llevar un historial sobre el grado de desgaste presente en una determinada tubería o unidad de proceso, para de esta manera poder prever fallas ocasionadas por roturas o fisuras en las paredes.

Con el antecedente de los niveles de desgaste se realiza un análisis estadístico que permite programar las fechas de las siguientes inspecciones, en la actualidad este análisis no diferencia entre niveles de desgaste excesivo y niveles con desgaste normal, lo que ocasiona fechas inmediatas de próxima revisión, con lo cual el costo que representa a la Refinería, si tenemos en cuenta que la fecha recomendable para inspeccionar es cada 5 años, es de 2 y en ocasiones más al gasto necesario designado para este fin.

Existe la necesidad de mejorar los procedimientos para la óptima programación de fechas de inspección y poder así agrupar los puntos con velocidades de desgaste mayores y realizar una programación en ellos tal que permita mantener un control de espesor que proporcione menor riesgo en la operación, sin inspeccionar de más puntos que pueden ser programados a tiempos de inspección más largos y de esta manera mejorar la productividad en las actividades de medición de espesores.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer una nueva metodología que optimice el procedimiento para determinar las fechas de próxima medición de espesores en refinerías de PEMEX.

1.1.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Establecer un criterio para caracterizar el grupo de mediciones de espesores que se obtienen durante una inspección, con base en la velocidad de desgaste se clasificarán los niveles de medición (conjunto de posiciones de medición que se deben efectuar en un mismo sitio de una tubería), en niveles con desgaste normal y excesivo.



- Una vez clasificado el grupo de valores de espesores, realizar un análisis estadístico por separado en cada conjunto de valores para determinar la fecha de próxima inspección, de esta forma se obtendrán dos fechas que se pretende sean más acordes al desgaste de cada grupo de valores.
- Se intenta que los tiempos de inspección para niveles con desgaste normal sean cada 5 años (máximo lapso permitido en la normatividad de PEMEX Refinación) y así evitar revisiones recurrentes en menores lapsos de tiempo, lo cual trae como resultado una disminución en los costos de inspección para la Refinería.

1.2 ALCANCE DEL PROYECTO

Proponer una nueva metodología sobre la forma de determinar las fechas de próxima medición, realizando un tratamiento estadístico por separado a los puntos de medición de tuberías con mayor desgaste que resulten de las inspecciones, que pueda implementarse en cualquier planta industrial en la cual existan problemas con el desgaste en tuberías y equipos de proceso, con la finalidad de disminuir el riesgo de accidentes con el costo económico, ambiental y moral que ello conlleva.



CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO





2. MARCO TEÓRICO (2, 3, 7, 8, 9)

2.1 ORIGEN DEL PROBLEMA

Desde que comenzaron a operar las instalaciones industriales se han venido suscitando problemas relacionados con el desgaste de las tuberías, no obstante a pesar de las medidas que cada día se implementan esta problemática persiste.

La disminución de espesor de las paredes de las tuberías se debe principalmente a factores como la corrosión y la abrasión, la primera es debida a las condiciones ambientales y/o al poder corrosivo de los fluidos que se transportan o almacenan, la segunda es el desgaste que sufre el material ocasionado por la fricción al transportar el fluido, éstas problemáticas se acentúan si tomamos en cuenta las altas temperaturas y presiones que normalmente se requieren en los procesos.

El deterioro de la tubería implica una disminución de su vida útil en operación, lo cual representa riesgos que pueden desencadenar en accidentes, por ello es necesario desarrollar una metodología que aumente al máximo el rendimiento de las tuberías, sin que esto represente un peligro para las personas, las instalaciones o la producción.

Los daños ocasionados se traducen en una inversión adicional para la corrección de las consecuencias, por ello es importante llevar a cabo medidas preventivas para evitar, en lo posible tener que recurrir a las medidas correctivas, que a la postre resultan ser mucho más riesgosas y perjudiciales.

Los ingenieros son en la mayoría de casos los responsables de minimizar los costos y riesgos debidos al desgaste en muchos ámbitos como: Plantas generadoras de energía (térmica, nuclear, hidroeléctrica, eólica), plantas de manufactura, de procesos químicos, etc. Sin embargo muchas veces se ignoran las causas posibles y la forma de prevenirla.



Las pérdidas ocasionadas por problemas relacionados con el desgaste se pueden dividir en directas (relacionadas con el reemplazo de la parte dañada) o indirectas debidas a:

- a) Paros de planta no programados para efectuar reparaciones.
- b) Pérdidas de producto de contenedores, tanques, tuberías, etc.
- c) Pérdidas de eficiencia por corrosión en intercambiadores de calor.
- d) Contaminación por los derrames producidos a causa de corrosión en tanques, tuberías, etc.
- e) Por sobredimensionamiento de espesores de tuberías y equipos debido a la falta de información.

El desgaste es aparentemente inevitable, por tanto el ingeniero encargado de esta cuestión deberá valerse de sus conocimientos adquiridos en su formación a fin de lograr que la corrosión y la abrasión puedan ser controladas.

2.2 DESGASTE DE TUBERÍAS Y EQUIPOS DE PROCESO

En general se puede decir que el desgaste que sufren las tuberías y equipos de proceso se presenta de dos formas, ya sea por desgaste mecánico y/o por desgaste químico.

El desgaste mecánico es la remoción del metal interior de la tubería como resultado del contacto entre componentes, en este caso del fluido con las paredes de la tubería. Por otro parte, el desgaste químico es el daño que sufre el material que constituye las tuberías por la acción de diferentes agentes químicos ya sea que estén presentes en el fluido o simplemente por las acciones corrosivas del medio ambiente.



2.3 ABRASIÓN

La erosión o desgaste por abrasión en tuberías es proporcional a la velocidad y cantidad del flujo, por tal motivo en la práctica se puede observar que los mayores desgastes por este fenómeno se encuentran en codos, tee's e injertos y en general en cualquier cambio de dirección del fluido.

2.4 CORROSIÓN

El fenómeno de la corrosión afecta muchas áreas importantes desde la construcción de puentes, aeroplanos, barcos, etc. hasta la rotura de tubos de escape en los automóviles, el continuo cambio de los serpentines de los boilers domésticos, roturas de los tanques de almacenamiento y tuberías de agua. En la industria de refinación afecta en la rotura de equipos, ductos o tuberías que transportan o almacenan crudo o sus derivados, que aparte del costo que acarrea el cambio del mismo hay que tener en cuenta las consecuencias como; el paro del proceso en la refinería con su respectiva pérdida de producción, el problema de contaminación al medio ambiente en muchos casos irreparable y la seguridad del personal.

2.4.1 DEFINICIÓN

En la literatura referente al tema se pueden encontrar diversas definiciones de lo que es la corrosión, la mayoría de autores coincide en que es un fenómeno que provoca el deterioro de un material al estar en interacción con el medio que lo rodea, produciéndose así cambios de sus propiedades tanto físicas como químicas. En particular, la corrosión metálica es el resultado destructivo debido a una reacción química o electroquímica entre el metal y el fluido que se transporta o procesa.



2.4.2 TIPOS DE CORROSIÓN

Existen diferentes criterios para clasificar las distintas formas en que se presenta la corrosión, algunos de ellos se muestran a continuación:

- Con base en la morfología del ataque.
- Con base al medio atacante.
- Por acciones físicas o químicas.
- En base a los mecanismos de reacción.

2.4.2.1 CON BASE EN LA MORFOLOGÍA DEL ATAQUE

Se ha clasificado a la corrosión según la apariencia que esta cause en el material, de tal manera que en ocasiones a simple vista es fácil determinar la forma de corrosión presente, pero en otras ocasiones es necesario revisarlo de forma microscópica para poder saberlo.

Corrosión por deterioro uniforme

Se caracteriza por una reacción química o electroquímica que actúa uniformemente sobre toda la superficie del metal expuesto a la corrosión. Toda el área superficial se corroe a la misma velocidad y se puede predecir la pérdida de material en un cierto periodo de tiempo.

Corrosión galvánica

Es una de las más comunes formas de corrosión, se presenta cuando metales distintos que poseen potenciales electroquímicos diferentes están en contacto directo o por medio de un conductor eléctrico, lo cual provoca la degradación del metal menos resistente a la corrosión.



Corrosión por picado

Es una forma de ataque localizado y se caracteriza por tener hoyos a través de la pieza metálica, ésta es una de las más destructivas formas de corrosión que puede hacer fallar a las instalaciones con un mínimo en pérdida de peso de la estructura total. Es difícil detectar los hoyos debido a su pequeño tamaño, ya que están cubiertos por productos de corrosión. Además es difícil comparar el grado de picado debido a la gran variedad de profundidades y número de hoyos que pueden presentarse en condiciones idénticas.

Corrosión por grietas

Es una forma de corrosión electroquímicamente localizada que puede presentarse en hendiduras y bajo superficies protegidas, donde pueden existir soluciones estancadas. Este tipo de corrosión tiene una reconocida importancia en ingeniería toda vez que su presencia es frecuente bajo juntas, remaches, pernos y tornillos, entre válvulas y sus asientos, bajo depósitos porosos, etc. La corrosión por grietas se produce en muchos sistemas de aleaciones como el acero inoxidable y aleaciones de titanio, aluminio y cobre.

Para que ocurra este tipo de corrosión, la grieta ha de ser lo suficientemente ancha para permitir que se introduzca líquido, pero a la vez lo bastante estrecha para mantener estancado el líquido.

Corrosión intergranular

La corrosión intergranular es un deterioro por corrosión localizada y/o adyacente a los límites de grano de una aleación. Bajo condiciones ordinarias, si un metal se corroe uniformemente, los límites de grano serán sólo ligeramente más reactivos que la matriz. Sin embargo, bajo otras condiciones, las regiones de límite de grano pueden ser muy reactivas, resultando en una corrosión intergranular que origina pérdida de la resistencia de la aleación e incluso la desintegración en los bordes de grano.



2.4.2.2 CON BASE AL MEDIO ATACANTE

Corrosión por ácidos

Se presenta cuando se encuentran en contacto un metal y un medio ácido originándose reacciones entre los iones metálicos y los del ácido. La velocidad con que el material se corroe depende de la concentración del ácido. Por ejemplo, la reacción de iones hidrógeno con los carbonos del acero para formar metano, da como resultado una descarbonización, esto provoca la formación de huecos y burbujas sobre la superficie del metal afectado.

Corrosión biológica

La corrosión influenciada microbiológicamente ocurre cuando se encuentran bacterias, esto ocurre preferentemente en tuberías. Las bacterias tienen preferencia por las paredes de las tuberías para formar sus colonias y una vez que se establecen, se protegen con una película viscosa. Esta película las protege de los inhibidores y biocidas, así que para que éstos tengan efecto, es necesario primero remover esta película mecánicamente con cepillos.

Corrosión atmosférica

De todas las formas de corrosión, la atmosférica es la que produce mayor cantidad de daños en el material y en mayor proporción. Grandes cantidades de metal de automóviles, puentes o edificios están expuestas a la atmósfera y por lo mismo se ven atacados por oxígeno y agua. La severidad de esta clase de corrosión se incrementa cuando la sal, los compuestos de sulfuro y otros contaminantes atmosféricos están presentes. En el ámbito industrial existe un ambiente que contiene compuestos sulfurosos, nitrosos y otros agentes ácidos que pueden promover la corrosión de los metales.



Corrosión de estructuras enterradas

Un metal que se halle enterrado, al igual que sucede en uno que se encuentre sumergido, podrá sufrir ataque corrosivo con mayor o menor intensidad, la cual dependerá tanto de la naturaleza del metal mismo como de la agresividad del terreno.

2.4.2.3 POR ACCIONES FÍSICAS O QUÍMICAS

Corrosión por esfuerzo

La rotura por corrosión por esfuerzo “SCC” (*Stress Corrosion Cracking*), se refiere a la rotura originada por la combinación de efectos de tensiones intensas y corrosión específica que actúa en el entorno del metal. Durante el SCC el ataque que recibe la superficie del metal es generalmente muy pequeño, mientras que las grietas aparecen claramente localizadas y se propagan a lo largo de la selección del metal.

Corrosión erosiva

La corrosión erosiva puede ser definida como la aceleración en la velocidad de ataque corrosivo al metal debida al movimiento relativo de un fluido corrosivo y una superficie metálica. Cuando el movimiento relativo del fluido corrosivo es rápido, los efectos del desgaste mecánico y abrasión pueden ser severos. La corrosión erosiva está caracterizada por la aparición en la superficie del metal de surcos, valles, hoyos, agujeros redondeados y otras configuraciones dañinas de la superficie del metal, las cuales generalmente se presentan en la dirección de avance del fluido corrosivo.

El metal es removido de la superficie como iones disueltos o como productos sólidos de corrosión; así, mientras la erosión es un problema estrictamente mecánico, la corrosión erosiva es la combinación de una acción mecánica y una reacción química o electroquímica. Todos los equipos expuestos a fluidos en movimiento están sujetos a este tipo de corrosión, por ejemplo: Tuberías, bombas, válvulas, etc.



Corrosión por cavitación

Es una forma especial de corrosión por erosión y es llevada a cabo por la formación y colapso de burbujas de vapor en un líquido cercano a la superficie del metal. Este tipo de daño ocurre en turbinas hidráulicas, impulsores de bombas y otras superficies donde existan cambios de presión y un líquido fluyendo a alta velocidad, además si éste es corrosivo, la severidad del daño por corrosión se incrementa.

2.4.2.4 EN BASE A LOS MECANISMOS DE REACCIÓN

Según el mecanismo del proceso existen dos casos fundamentalmente distintos, la oxidación directa y la corrosión electroquímica.

La principal diferencia entre ambos mecanismos estriba en que la corrosión electroquímica requiere la presencia de un electrolito para llevarse a cabo, mientras que en la oxidación directa no es necesaria la presencia de dicho electrolito.

Oxidación directa

El metal se combina con el medio por acción directa, los átomos metálicos reaccionan químicamente con la sustancia agresiva. Este tipo de corrosión es un fenómeno normal en los metales expuestos a gases y vapores calientes.

Corrosión electroquímica

Se debe a la actuación de pilas electroquímicas en las que la disolución metálica ocurre en regiones llamadas anódicas, en este caso, el proceso no afecta a toda la superficie por igual, ya que en regiones catódicas no hay ataque. La corrosión electroquímica se lleva a cabo cuando los metales se hallan en contacto con medios de conductividad electrolítica, en particular con el agua, soluciones salinas o la simple humedad de la atmósfera y de los suelos.



2.4.3 CONTROL DE LA CORROSIÓN

La corrosión puede ser controlada o prevenida por muchos métodos diferentes. Desde el punto de vista industrial, los aspectos económicos son normalmente los que determinan el método a elegir. Entonces se deberá determinar si es más conveniente reemplazar un equipo o cambiar su diseño o el material con el que fue construido. A continuación se explican algunos de los métodos más comunes de control o prevención de la corrosión.

2.4.3.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

Materiales metálicos. Uno de los métodos más comunes de control de la corrosión es la utilización de materiales que son resistentes a la corrosión para un determinado medio. Cuando se seleccionan los materiales para un diseño de ingeniería en el que es importante la resistencia a la corrosión, se deberán consultar en diversas fuentes bibliográficas.

Existen, sin embargo, algunas reglas generales que son bastante aceptadas y que pueden ser aplicadas cuando se seleccionan metales y aleaciones para aplicaciones de ingeniería. Éstas son:

1. Para condiciones no oxidantes o reductoras tales como ácidos y soluciones acuosas libres de aire, se utilizan frecuentemente aleaciones de níquel y cromo.
2. Para condiciones oxidantes se usan aleaciones que contengan cromo.
3. Para condiciones altamente oxidantes se aconseja el titanio y sus aleaciones.



Un material que suele ser mal utilizado es el acero inoxidable, ya que no es una aleación específica sino un término genérico usado para una larga serie de clases de acero con contenidos en cromo por encima del 12%. Los aceros inoxidables se usan normalmente para medios corrosivos que son moderadamente oxidantes. Sin embargo, los aceros inoxidables son menos resistentes a las soluciones que contienen cloruros y son más susceptibles a las roturas debidas a la corrosión por esfuerzo que el acero estructural ordinario. Por tal razón, se debe prestar especial atención para asegurarse que los aceros inoxidables no se usen en aplicaciones para los que no sean adecuados.

Materiales no metálicos. En general materiales poliméricos tales como los plásticos y los cauchos son débiles y blandos, por tanto su utilización como materiales resistentes a la corrosión es muy limitada. En cambio, los materiales cerámicos poseen una resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas, sin embargo, tienen la desventaja de ser altamente quebradizos. Por tanto, la utilización de materiales no metálicos en el control de la corrosión se concreta principalmente en la producción de forros, juntas y recubrimientos.

2.4.3.2 RECUBRIMIENTOS

Se utilizan recubrimientos metálicos, inorgánicos y orgánicos, que se aplican a los metales para prevenir o reducir la corrosión.

Recubrimientos metálicos. Los recubrimientos metálicos se aplican en capas finas y delgadas para separar el ambiente corrosivo del material. Estas capas se utilizan a veces de tal manera que pueden servir como ánodos de sacrificio, los cuales pueden ser corroídos en lugar del metal subyacente. Un ejemplo de esto es el galvanizado, que consiste en aplicar una capa de zinc sobre el acero.



Muchas partes metálicas son protegidas por electrodeposición para producir una fina capa de metal. En este proceso la parte que va a ser recubierta constituye el cátodo de una celda electrolítica. El electrolito es una solución de una sal del metal que se va a convertir en el recubierto y se aplica corriente continua a la parte que va a ser recubierta y a otro electrodo. La deposición puede realizarse en varias capas, como es el caso del cromado que se aplica a los automóviles. Esta electrodeposición consta de tres capas, una interior de cobre para lograr la adhesión del recubrimiento al acero, una capa intermedia de níquel para conseguir una buena resistencia a la corrosión y una fina capa de cromo para dar una buena apariencia.

Algunas veces se aplica por laminación una fina capa de material metálico a la superficie del metal que ha de ser protegido. La delgada capa exterior de metal proporciona resistencia a la corrosión al metal interno.

Recubrimientos inorgánicos. Para algunas aplicaciones es deseable cubrir el acero con un recubrimiento cerámico que le confiere un acabado terso y duradero. El acero se recubre normalmente con una fina capa de vidrio fundido, de tal modo que se adhiera bien y presente un coeficiente de expansión ajustado al metal base. En algunas industrias químicas se ha impuesto el uso de recipientes de acero vidriados ya que son fáciles de limpiar y tienen una gran resistencia a la corrosión.

Recubrimientos orgánicos. Desde hace años se ha generalizado el uso de pinturas, barnices, lacas y muchos otros materiales orgánicos poliméricos a fin de proteger materiales de la corrosión. Estos materiales proveen barreras finas, tenaces y duraderas para proteger el sustrato metálico de medios corrosivos. Sobre una base de peso, el uso de capas orgánicas protege de una forma muy eficaz al metal de la corrosión. No obstante, se deben elegir revestimientos adecuados y se deben aplicar de modo conveniente sobre superficies bien preparadas. En muchos casos, los resultados poco favorables pueden atribuirse a la mala aplicación y preparación de las superficies; también se debe tener cuidado en no aplicar revestimientos orgánicos en aquellos casos en que se prevea que el metal pueda ser atacado rápidamente si la película protectora se rompe.



2.4.3.3 DISEÑO

En ingeniería un diseño adecuado de un equipo resulta importante tanto para prevenir la corrosión como para seleccionar los materiales adecuados. Se debe considerar materiales adecuados teniendo en cuenta los requerimientos metálicos, electrónicos y térmicos. Todas estas consideraciones deben sopesarse con las limitaciones económicas. En el diseño de un sistema, la aparición de problemas específicos de corrosión puede requerir la consulta a expertos en la materia. Sin embargo, algunas reglas generales de diseño, como las siguientes deben ser conocidas:

1. Se ha de tener en cuenta la acción penetrante de la corrosión junto con los requerimientos de fuerza mecánica cuando se considere el espesor del metal utilizado. Esto es especialmente importante para las tuberías y tanques que contengan líquidos a presión.
2. Son preferibles los recipientes soldados que los remachados para reducir la corrosión por grietas; si se usan remaches, hay que elegir aquellos que sean catódicos a los materiales que se combinan.
3. Si es posible, se deben usar metales galvánicamente similares para la estructura completa. Se han de evitar materiales no similares que puedan dar lugar a la corrosión galvánica. Si se atornillan juntos metales no similares galvánicamente, hay que usar juntas no metálicas para prevenir contactos eléctricos entre los metales.
4. Es preciso evitar una tensión excesiva y concentraciones de tensión en entornos corrosivos, para prevenir la ruptura por corrosión por esfuerzos. Esto es especialmente importantes cuando se utilizan aceros inoxidable, latones y otros materiales susceptibles a este tipo de ruptura en ciertos entornos corrosivos.
5. Se deben evitar, en lo posible, cambios de dirección en sistemas de tuberías por donde circulan fluidos. En estas áreas se potencia la corrosión por erosión.



6. Se ha de cuidar el diseño de tanques y otros recipientes para que sean fáciles de drenar y limpiar. Depósitos estancados de líquidos corrosivos provocan la aparición de celdas (o pilas) por concentración potenciando así la corrosión.
7. Se deben diseñar sistemas que faciliten el traslado y sustitución de aquellas que se espera queden inservibles en poco tiempo. Por ejemplo, las bombas en las plantas químicas deberían ser fácilmente trasladables.
8. Es importante diseñar sistemas de calefacción que no den lugar a zonas de puntos calientes. Los cambiadores de calor, por ejemplo, deberían ser diseñados para conseguir gradientes de temperatura uniformes.

2.4.3.4 ALTERACIÓN POR EL ENTORNO

Las condiciones ambientales pueden ser muy importantes al determinar la gravedad de la corrosión. Algunos de los métodos más importantes para reducir la corrosión por cambios ambientales son: 1) bajar las temperaturas, 2) disminuir la velocidad de los líquidos, 3) eliminar el oxígeno de los líquidos, 4) reducir las concentraciones de iones, y 5) añadir inhibidores a los electrolitos.

1. Generalmente, bajando la temperatura de un sistema se consigue reducir la corrosión, debido a que la velocidad de reacción disminuye a bajas temperaturas, no obstante, existen algunas excepciones en las cuales se da el fenómeno inverso. Por ejemplo, el agua de mar a ebullición es menos corrosivo que el agua de mar fría debido a que la solubilidad del oxígeno disminuye con el aumento de la temperatura.
2. Disminuyendo la velocidad de un fluido corrosivo se reduce la erosión. Sin embargo, para metales y aleaciones que se pasivan es más importante evitar las disoluciones estancadas.
3. Eliminar el oxígeno de las disoluciones acuosas es, provechoso para reducir la corrosión. Por ejemplo las calderas de agua suelen ser desoxigenadas para reducir la corrosión; sin embargo, para sistemas que dependen del oxígeno para pasivarse, la desaireación es indeseable.



4. La reducción de la concentración de iones corrosivos en una solución que está corroyendo un metal puede hacer que disminuya la velocidad de corrosión del metal. Por ejemplo, la reducción de la concentración del ion cloruro en una disolución acuosa reducirá el ataque corrosivo sobre aceros inoxidables.
5. La adición de inhibidores a un sistema puede conseguir una disminución de su corrosión. Los inhibidores son, esencialmente, catalizadores de retardo. Sus acciones varían considerablemente. Por ejemplo, los inhibidores tipo absorción, son absorbidos por una superficie y forman una película protectora. Los inhibidores tipo desoxidante o barrenero reaccionan para eliminar agentes de corrosión, tales como el oxígeno de una disolución.

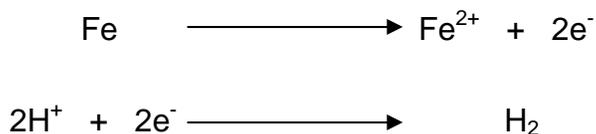
2.4.3.5 PROTECCIÓN CATÓDICA Y ANÓDICA

Protección catódica. El control de la corrosión puede ser conseguido por el método de protección catódica, en el cual se suministran electrones a la estructura que ha de ser protegida.

La protección catódica consiste en obligar a la estructura a funcionar como un cátodo en una celda de corrosión, mediante la manipulación y/o modificación de factores electroquímicos y ocurre cuando metal es forzado a ser el cátodo de la celda corrosiva adhiriéndole (acoplándolo o recubriéndolo) de un metal que se corroa más fácilmente que él, de forma tal que esa capa recubridora de metal se corroa antes que el metal que está siendo protegido y así se evite la reacción corrosiva. Una forma conocida de protección catódica es la galvanización, que consiste en cubrir un metal con zinc para que éste se corroa primero. Lo que se hace es convertir al zinc en un ánodo de sacrificio, porque él ha de corroerse antes que la pieza metálica protegida.



Por ejemplo, la corrosión de una estructura de acero en un medio ácido involucra las siguientes ecuaciones electroquímicas:



Si se suministran electrones a la estructura de acero, la disolución del metal, es decir, la corrosión, se detendrá y la velocidad de desprendimiento de hidrógeno aumentará. Por eso, si los electrones son suministrados de modo continuo a la estructura del acero, la corrosión se disminuirá. Los electrones para la protección catódica, pueden ser suministrados por una fuente de corriente continua externa o por acoplamiento galvánico con un metal más anódico que el que está siendo protegido, ver figura 2.1 “Proceso de inspección mediante líquidos penetrantes”.

Protección anódica. La protección anódica es un método similar que consiste en recubrir el metal con una fina capa de óxido para que no se corroa. Existen metales como el Aluminio que al contacto con el aire son capaces de generar espontáneamente esta capa de óxido y por lo tanto, se hacen resistentes a la corrosión. Aún así, la capa de óxido que recubre al metal no puede ser cualquiera, tiene que ser adherente y muy firme, ya que de lo contrario no serviría de nada.



2.5. MÉTODOS PARA INSPECCIONAR TUBERÍAS

En la práctica la medición de espesores se realiza mediante Pruebas No Destructivas (*PND*), las cuales son la aplicación de métodos físicos indirectos, como es la transmisión del sonido, la opacidad al paso de la radiación, etc. y tienen la finalidad de verificar la homogeneidad y continuidad de las piezas examinadas, éstas pruebas no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material, algunas de estas pruebas se mencionan a continuación.

2.5.1 INSPECCIÓN VISUAL

La inspección visual, es sin duda una de las pruebas no destructivas más ampliamente utilizadas, ya que gracias a esta, se puede obtener información rápidamente de la condición de los materiales que se estén inspeccionando, con el simple uso del ojo humano.

Durante la inspección visual, en muchas ocasiones el ojo humano recibe ayuda de algún dispositivo óptico, ya sea para mejorar la percepción de las imágenes recibidas por el ojo como anteojos, lupas, etc. o bien para proporcionar contacto visual en áreas de difícil acceso, tal es el caso de la inspección del interior de tuberías de diámetro pequeño, en cuyo caso se pueden utilizar boroscopios, pequeñas videocámaras, etc.

Es importante mencionar que el personal que realiza la inspección visual debe tener conocimiento sobre los materiales que esté inspeccionando y del tipo de irregularidades o discontinuidades a detectar en los mismos. Con esto se concluye que el personal encargado de realizar la inspección visual debe tener capacitación y cierto nivel de experiencia para que la prueba resulte confiable.



2.5.2 LÍQUIDOS PENETRANTES

Se basa en el principio físico conocido como "capilaridad" y consiste en la aplicación de un líquido, con buenas características de penetración en pequeñas aberturas, sobre la superficie limpia del material a inspeccionar.

Una vez que ha transcurrido un tiempo suficiente, como para que el líquido penetrante recién aplicado penetre considerablemente en cualquier abertura superficial (a este lapso de tiempo se le conoce como tiempo de penetración, el cual oscila entre 5 y 15 minutos dependiendo del material y de la clase de grietas), se realiza una remoción o limpieza del exceso de líquido penetrante, mediante el uso de algún material absorbente (papel, trapo, etc.), a continuación se aplica un líquido absorbente comúnmente llamado revelador de color diferente al líquido penetrante, el cual absorberá el líquido que haya penetrado en las aberturas superficiales.

Las áreas en las que se observe la presencia de líquido penetrante después de la aplicación del material absorbente, son áreas que contienen discontinuidades superficiales (grietas, perforaciones, etc.). En la figura 2.1 se puede observar de una forma esquemática el proceso de inspección mediante líquidos penetrantes.

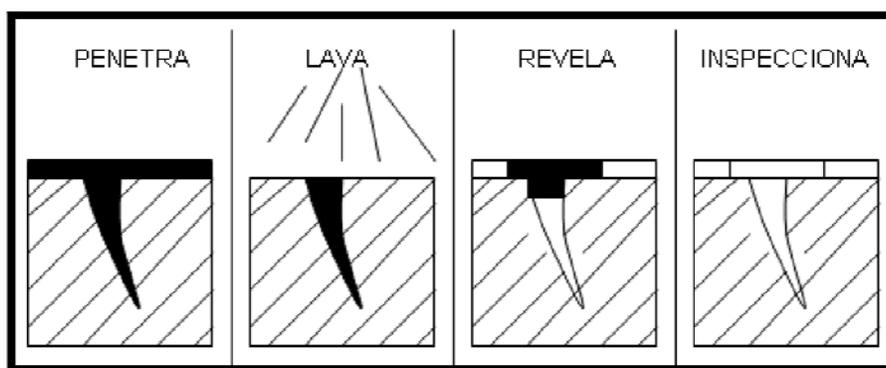


Figura 2.1 Proceso de inspección mediante líquidos penetrantes.



El penetrante ideal para fines de inspección deberá reunir las siguientes características:

- Habilidad para penetrar orificios y aberturas muy pequeñas y estrechas.
- Habilidad de mantener color o fluorescencia.
- Habilidad de extenderse en capas muy finas.
- Resistencia a la evaporación.
- De fácil remoción de la superficie.
- De fácil eliminación una vez dentro de la discontinuidad.

Para cumplir los requisitos anteriores deberán combinarse diferentes propiedades, entre las cuales las más importantes son la tensión superficial, el poder humectante, la viscosidad, volatilidad, punto de inflamación, inactividad química y capacidad de disolución.

Tensión superficial.- Es una de las propiedades más importantes, se requiere una tensión superficial baja para obtener buenas propiedades de penetración y mojado.

Poder humectante: El líquido debe ser capaz de mojar completamente la superficie del material, el ángulo de contacto del líquido con la superficie debe ser lo más bajo posible.

Viscosidad.- Esta propiedad no produce efecto alguno en la habilidad de un líquido para “penetrar”, aunque afecta la velocidad de penetración. Los penetrantes de alta viscosidad penetran lentamente, en tanto que los de baja viscosidad se escurren muy rápido y tiene la tendencia a no ser retenidos en los defectos de poca profundidad, por lo que se recomienda una viscosidad media.

Volatilidad.- Los líquidos penetrantes no deben ser volátiles, ya que si existe una evaporación excesiva de los productos del penetrante, se verá afectada la sensibilidad de todo el proceso, debido tanto al desequilibrio de la fórmula, como a la pérdida del poder humectante.



Punto de inflamación.- Como medida de seguridad los líquidos penetrantes deberán poseer un punto de inflamación elevado con el fin de reducir los peligros de incendio.

Inactividad química.- Los productos usados en la formulación de los líquidos penetrantes deben ser inertes y no corrosivos con respecto a los materiales a ser ensayados y a los recipientes que los contienen.

Capacidad de disolución: El penetrante debe tener una elevada capacidad para contener grandes concentraciones de los pigmentos coloreados o fluorescentes usados y para mantener dichos componentes en solución.

Los sistemas penetrantes generalmente se identifican por el método empleado en la remoción del exceso del líquido penetrante. Estos sistemas son:

- a) Removible con agua.
- b) Post-emulsificable lipofílico.
- c) Removible con solventes.
- d) Post-emulsificante hidrofílico.

Estos sistemas son comunes tanto a los tipos de penetrante fluorescente como a los de colorante visible.

Sistema penetrante removible con agua

Consiste en un líquido penetrante lavable con agua, que al ser aplicado a la superficie de la pieza y después de haberlo dejado un tiempo de penetración suficiente se retira de la superficie de la pieza mediante lavado con agua. Los penetrantes empleados en los procesos lavables con agua no son soluciones simples sino formulas que contienen ciertos ingredientes tales como aceites penetrantes, colorantes, agentes emulsificadores y agentes estabilizadores. El objetivo de la formulación es producir un líquido único que contiene características de buena penetrabilidad y solubilidad del colorante con propiedades de lavado bajo la acción del agua y que mantenga su estabilidad bajo condiciones variables de temperatura y otras variables de operación.



Sistema penetrante post-emulsificable lipofílico

Este método consiste en la aplicación de un líquido penetrante post-emulsionable a la superficie de la pieza. Después del periodo de penetración adecuado, al penetrante se hace lavable con agua mediante la aplicación de un emulsificador lipofílico, es decir, de base oleosa, el cual se mezcla con el penetrante por ser mutuamente solubles. En este sistema se requiere un tiempo de emulsificación muy exacto y se debe tener mucho cuidado para que el penetrante no sea sobreemulsificado y pueda ser removido de las discontinuidades en el lavado posterior con agua.

Sistemas penetrantes removible con solventes

Los líquidos penetrantes removibles con solventes solo deberán emplearse para inspección puntual y cuando por razón del tamaño de la pieza, masa y condición de la superficie el método de lavado con agua no es factible o práctico. En este método, el exceso de penetrante se elimina en dos etapas, primero se elimina todo el penetrante posible limpiando la superficie de la pieza con un paño limpio y absorbente, exento de pelusa, después a la capa superficial de penetrante que queda se elimina pasando por la pieza un paño ligeramente impregnado de un disolvente apropiado. Es necesario tener cuidado de no emplear demasiado disolvente con el fin de minimizar la posibilidad de eliminar el penetrante contenido en las discontinuidades.

Sistema penetrante post-emulsificable hidrofílico

Al igual que en el caso del sistema post-emulsificable lipofílico, después de transcurrido el tiempo de penetración, se aplica un emulsificador, en este caso de base acuosa, el cual no se mezcla con el penetrante por no ser éstos mutuamente solubles, sino que actúa rompiendo la cadena de carbono de la base oleosa del penetrante, emulsificando gradualmente capa por capa.



Cada una de las técnicas existentes en el método de líquidos penetrantes tiene sus ventajas, desventajas y sensibilidad asociada, la elección de la técnica a utilizar dependerá del material en cuestión, el tipo de discontinuidades a detectar y el presupuesto con el que se cuente.

2.5.3 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

La base de esta técnica es el principio físico conocido como “magnetismo”, el cual exhiben principalmente los materiales ferrosos como el acero y consiste en la capacidad o poder de atracción entre metales, es decir, cuando un metal es magnético atrae en sus extremos o polos a otros metales igualmente magnéticos o con capacidad para magnetizarse.

De acuerdo con lo anterior, si un material magnético presenta discontinuidades en su superficie, éstas actuarán como polos y por tanto atraerán cualquier material magnético que esté cercano a las mismas. De esta forma se le pueden esparcir sobre su superficie pequeños trozos o diminutas partículas magnéticas y así observar cualquier acumulación de las mismas, lo cual es evidencia de la presencia de discontinuidades sub-superficiales y/o superficiales en el metal.

Esta forma de inspección se limita a la detección de discontinuidades superficiales y en algunas ocasiones sub-superficiales. Así mismo, su aplicación también se encuentra limitada por su carácter magnético, es decir, solo puede ser aplicada en materiales ferromagnéticos. Aún así, este método es ampliamente utilizado en el ámbito industrial.

En general, existen dos principales medios o mecanismos mediante los cuales se pueden aplicar las partículas magnéticas, éstos son la vía húmeda y la vía seca. Cuando las partículas se aplican en vía húmeda, éstas normalmente se encuentran suspendidas en un medio líquido tal como el aceite o el agua. En la aplicación de las partículas magnéticas vía seca, éstas se encuentran suspendidas en aire.



Así mismo, existen dos principales tipos de partículas magnéticas, aquellas que son visibles con luz blanca natural o artificial y aquellas cuya observación debe ser bajo luz negra o ultravioleta, conocidas comúnmente como partículas magnéticas fluorescentes.

Cada medio de aplicación (húmedo o seco) y cada tipo de partículas magnéticas (visibles o fluorescentes) tienen sus respectivas ventajas y desventajas. El medio y el tipo de partícula a utilizar lo determinan distintos factores, de entre ellos se puede mencionar: El tamaño de las piezas a inspeccionar, el área a inspeccionar, el medio ambiente bajo el cual se realizará la prueba, el tipo de discontinuidades a detectar y el costo.

El personal que realiza las pruebas antes descritas generalmente realiza un análisis de los factores anteriores para determinar cual es el medio y el tipo óptimo de partícula magnética a utilizar para cierta aplicación específica. Otro factor importante a considerar, es la forma o mecanismo mediante el cual se magnetizarán las piezas o el área a inspeccionar, lo cual puede conseguirse de distintas formas, ya sea mediante el uso de un yugo electromagnético, puntas de contacto, imanes permanentes, etc.

2.5.4 RADIOGRAFÍA

El principio básico se basa en la propiedad que poseen los materiales de atenuar o absorber parte de la energía de radiación cuando son expuestos a ésta.

En la industria se emplean dos tipos de radiación para la inspección radiográfica, estos son los rayos X y los rayos gamma, con este tipo de radiación es posible irradiar un material y si dicho material presenta cambios internos considerables como para atenuar o absorber la radiación, entonces es posible determinar la presencia de discontinuidades internas, tales como grietas, porosidades, etc. simplemente midiendo o caracterizando la radiación incidente contra la radiación retenida por el material.



Las discrepancias de atenuación produce diferencias en la ionización del bromuro de plata de la película radiográfica y esto provocará al revelar la película, cambios de densidad radiográfica lo cual se observa con el grado de ennegrecimiento.

El método radiográfico es sumamente importante porque permite obtener una visión de la condición interna de los materiales, por tal motivo es altamente utilizada en aplicaciones industriales en la evaluación de soldaduras principalmente.

Sin embargo, a pesar de las ventajas con las que cuenta este método, como lo es la posibilidad de utilizarse en materiales metálicos y no metálicos o la facilidad para identificar el tipo de discontinuidad que se detecta, sin embargo también conlleva sus limitaciones, debido a que el equipo necesario para realizar una prueba radiográfica puede representar una seria desventaja si se considera el costo de adquisición y mantenimiento. Más aún, dado que en este método de prueba se manejan materiales radiactivos, es necesario contar tanto con un permiso autorizado para su uso, como también, con detectores de radiación para asegurar la integridad y salud del personal que realiza las pruebas radiográficas.

2.5.5 ULTRASONIDO

El método ultrasónico se basa en la generación, propagación y detección de ondas elásticas (sonido) a través de los materiales. Para la inspección por este método es necesario un sensor o transductor acústicamente acoplado en la superficie de un material, este sensor contiene un elemento piezoeléctrico cuya función es convertir pulsos eléctricos en pequeños movimientos o vibraciones, las cuales a su vez generan sonido, con una frecuencia en el rango de los MHz. inaudible al oído humano.



El sonido o las vibraciones, en forma de ondas elásticas, se propaga a través del material hasta que pierde por completo su intensidad o hasta que choca con una interfase, es decir, algún otro material tal como el aire o el agua y como consecuencia, las ondas pueden sufrir reflexión, refracción, distorsión, etc. lo cual puede traducirse en un cambio de intensidad, dirección y ángulo de propagación de las ondas originales.

Este método es útil cuando se pretende encontrar fugas a lo largo de una tubería, cuando esto ocurre el fluido (líquido o gas) se mueve desde el lado de alta presión a través del agujero al lado de baja presión de la fuga, donde se expande rápidamente y produce un flujo turbulento. Esta turbulencia tiene fuertes componentes ultrasónicos que son detectados por el instrumento, la intensidad de la señal cae velozmente desde la fuente, lo cual permite localizar exactamente el sitio de la fuga.

Ventajas

- Es una prueba que se realiza rápidamente y cuyos resultados se obtienen de igual manera y con resultados confiables.
- Alta sensibilidad que le da la posibilidad al método para detectar discontinuidades pequeñas.
- Alta capacidad de penetración, lo que permite localizar discontinuidades a gran profundidad del material.

Desventajas

- Es necesaria la participación de personal calificado para realizar la prueba.
- Requiere de patrones de calibración.
- Dificultad para detectar y evaluar discontinuidades cercanas a la superficie sobre la que se introduce el ultrasonido.
- Dificultad para inspeccionar piezas con geometrías complejas o cuya posición se dificulte para su medición, espesores muy delgados.
- La temperatura también es una limitante ya que se producirán cambios en la velocidad acústica del material y en la línea de retardo del transductor.



2.6 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Debido a que el conjunto de lecturas que se obtienen en una inspección de espesores son muchas y con rangos muy variados, es necesario realizar un análisis estadístico con el cual se puedan obtener los parámetros requeridos para calcular la fecha en la cual se debe realizar la siguiente medición.

La rama de la estadística que se encarga de la organización, síntesis y descripción de un conjunto de datos es la estadística descriptiva, con frecuencia algunos tipos de datos se presentan en una forma que describe la posición de una observación relativa a las demás observaciones de la distribución. Dos medidas de la posición relativa de una observación con respecto al grupo de valores son los cuartiles o percentiles y los valores de z (distancia entre un valor seleccionado (X) y la media poblacional (μ), dividida entre la desviación estándar de la población (σ)).

2.6.1 MEDIDAS DE POSICIÓN RELATIVA

Las medidas de posición son elementos estadísticos que sintetizan la información sobre los datos que analizamos, facilitando su manejo. En lugar de trabajar con toda la tabla de frecuencias, las medidas de posición resumen los valores que separan a los datos en grupos significativos. Una medida de posición es un indicador que se usa para señalar que porcentaje de datos dentro de la muestra se encuentra a un lado y a otro del mismo.

2.6.1.1 CUARTILES Y PERCENTILES

Los cuartiles son tres valores que dividen al conjunto de datos ordenados en cuatro partes porcentualmente iguales. Dado una serie de valores y_1, y_2, \dots, y_n se define al primer cuartil (Q_1) como la mediana de la primera mitad de los valores, es decir, es el valor por debajo del cual se encuentra un cuarto o el (25%) de todos los valores de la sucesión ordenada, el segundo cuartil (Q_2) es la mediana de la totalidad de la serie de valores, el tercer cuartil (Q_3) es el valor por debajo del cual quedan las tres



cuartas partes (75%) de los datos o dicho de otra manera el tercer cuartil es la mediana de la segunda mitad de valores.

En caso de contar con un conjunto de datos grandes, los cuartiles se pueden determinar localizando las áreas correspondientes bajo la curva de distribución de frecuencia relativa. Sin embargo, cuando el conjunto de datos de interés es reducido puede ser imposible encontrar una determinación en el conjunto de datos que exceda, por ejemplo, exactamente el 25% del resto de las determinaciones. Por lo tanto, el 25avo percentil (o cuartil inferior) del conjunto de datos no estará determinado de una forma clara. Para estos casos se pueden determinar cuartiles y percentiles de la siguiente forma:

Pasos a seguir para la determinación de cuartiles y percentiles para un número reducido de datos:

1. Ordenar las determinaciones del conjunto de datos en orden de magnitud creciente. Representando con y_1, y_2, \dots, y_n a los datos ordenados.
2. Evaluar la cantidad:

$$e = \frac{1}{4}(n + 1)$$

Donde:

e = Posición que ocupa el cuartil inferior en la serie de datos ordenados

n = Número de valores de la muestra

Número de valores de la muestra, si el resultado cae entre dos enteros, se redondea hacia el entero siguiente más cercano. El dato que ocupa esta posición denotada como $(y_{(e)})$, representa la posición en la cual se encuentra el valor del cuartil inferior o también llamado 25avo percentil (es decir si el resultado es 5, querrá decir que el primer cuartil se encuentra en la posición 5 del los datos que anteriormente debieron ser ordenados).



3. Calcular la cantidad:

$$e' = \frac{3}{4}(n + 1)$$

Donde:

e' = Posición que ocupa el tercer cuartil en la serie de datos ordenados

Si el resultado cae entre dos enteros, se redondea hacia el entero anterior más cercano. El dato que ocupa esta posición denotada como $(Y_{(e)})$, representa la posición en la cual se encuentra el valor del cuartil superior o también llamado 75avo percentil.

2.6.1.2 POSICIÓN RELATIVA MEDIANTE UNIDADES DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Otra medida útil de posición relativa es el valor de z . Por definición este valor describe la posición de una observación relativa a la media en unidades de la desviación estándar. Un valor de z negativo indica que la observación está ubicada a la izquierda de la media, por lo mismo un valor de z positivo indica que la observación se encuentra a la derecha de la media.

Por la regla empírica⁽²⁾ la mayor parte de las observaciones de un conjunto de datos, están a menos de 2 desviaciones estándar de la media, es decir, tienen valores de menores que 2 en valor absoluto y que casi todas están a menos de 3 desviaciones estándar de la media, en otras palabras, tiene valores de z menores que 3 en valor absoluto.

En concreto el valor de z de un dato o un conjunto de datos es la distancia a la que se encuentra por arriba o por debajo de la media, medida en unidades de la desviación estándar, el valor de z se define como:



$$z = \frac{y - \mu}{\sigma}$$

Donde:

z = Unidades de desviación estándar

y = Valor seleccionado

μ = Media poblacional

σ = Desviación estándar

2.6.2 MÉTODOS PARA DETECTAR DATOS ATÍPICOS DENTRO DE UN GRUPO DE VALORES

Como se ha mencionado, permanentemente hay ocasiones en las inspecciones de espesores en que algunas de las lecturas tomadas son inconsistentes con el promedio que registra el total de niveles calibrados. Una observación cualquiera que es inusualmente grande o pequeña en relación con los demás valores de un conjunto de datos se denominan valores atípicos, valores fuera de intervalo u “*outliers*” por el nombre que se le asigna en inglés.

2.6.2.1 UNIDADES DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR

El método más sencillo para determinar si una observación es un valor fuera de intervalo es calcular su valor de z (como se indica anteriormente), y de ahí determinar si el valor cae dentro de los parámetros establecidos, sin embargo existe otro procedimiento alternativo para detectar valores atípicos, el cual consiste en construir una gráfica de cuadro con los datos de la muestra. Con este método, se construye un rango denominado intervalo intercuartil (*IQR*), que es la distancia entre los cuartiles superior e inferior:



$$IQR = Q_{superior} - Q_{inferior}$$

Donde:

IQR = Rango intercuartil

$Q_{superior}$ = Tercer cuartil

$Q_{inferior}$ = Primer cuartil

El procedimiento es fácil de aplicar sobretodo en el caso de contar con un conjunto reducido de datos, en estos casos los cuartiles y el rango intercuartil se pueden determinar rápidamente, en caso contrario si se tiene un conjunto de datos muy extenso la utilización de una computadora y específicamente de un software como Excel resulta de mucha utilidad.

2.6.2.2 GRÁFICA DE CAJA O DE CUADRO

Es una excelente herramienta para transportar la ubicación y variación de información de un grupo de datos, particularmente para detectar e ilustrar la variación entre ellos.

A continuación se muestra el procedimiento a seguir para realizar una gráfica de cuadro "box plot", un ejemplo de ésta se muestra en la figura 2.2.

1. Se calcula la mediana (m), los cuartiles inferior (Q_1) y superior (Q_3) y el intervalo intercuartil (IQR), para el conjunto de datos.
2. Se construye un cuadro sobre o paralelo al eje horizontal, donde los extremos son (Q_1) y (Q_3), por lo que el ancho de la base del cuadro será igual al rango intercuartil, se dibuja una línea vertical dentro del cuadro para ubicar (m).



3. Se establecen dos conjuntos de límites en la gráfica, las cotas inferiores se localizan a una distancia de $1.5 IQR$ por debajo de Q_1 y por arriba de Q_3 , las cotas exteriores se encuentran a una distancia de 3 veces el IQR por debajo y por arriba de Q_1 y Q_3 respectivamente.
4. A las observaciones que caen entre las cotas inferiores se les denomina puntos medianamente fuera de la media poblacional “*mild outliers*” y a las observaciones que caen entre las cotas exteriores se les denomina puntos extremadamente fuera de la media “*extreme outliers*”.
5. A fin de destacar los valores extremos, se añaden a la gráfica de cuadro extensiones comúnmente llamadas “bigotes” (“*whiskers*”) por la traducción literal del inglés. Los “bigotes” se extienden 1.5 veces el rango intercuartil por debajo y por arriba del valor más pequeño y el valor más alto respectivamente que no son “*outliers*”.

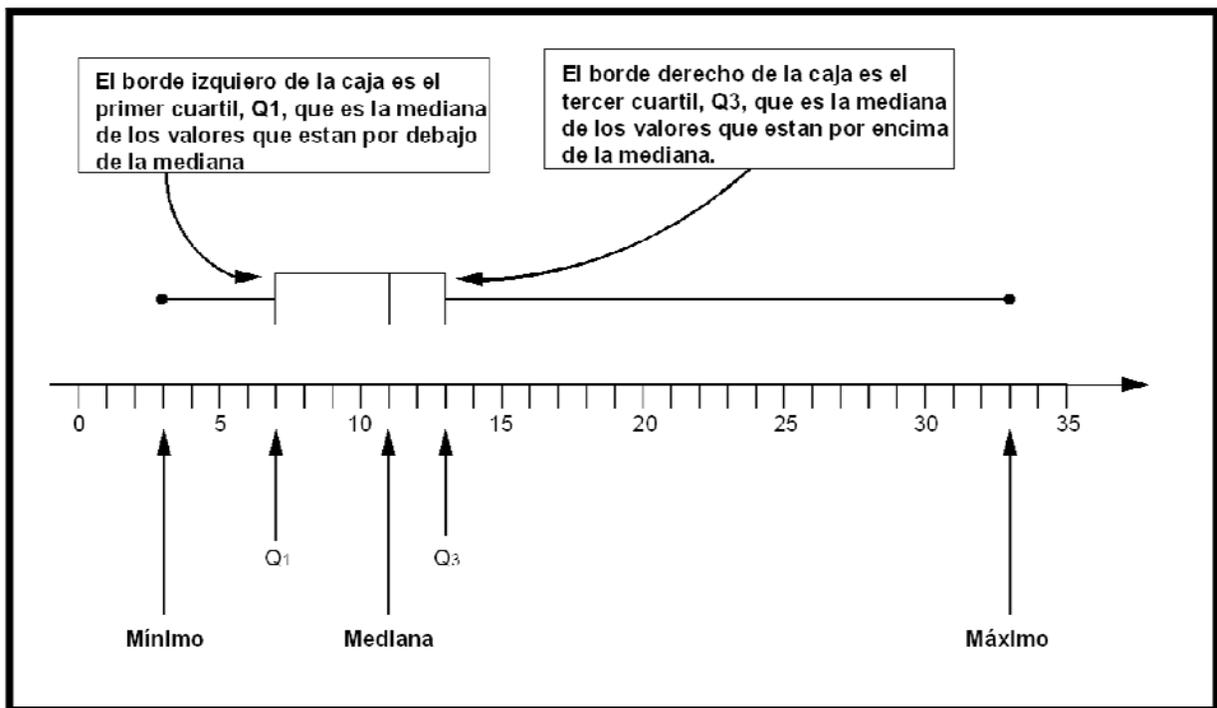


Figura 2.2 Ejemplo de una gráfica de caja.



CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA PARA LA
PROGRAMACIÓN DE TIEMPOS
DE INSPECCIÓN





3. METODOLOGÍA

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE ALQUILACIÓN ^(6, 16)

La función principal de la Planta de Alquilación es obtener una gasolina de alta pureza comúnmente llamado alquilado ligero, que se da como resultado de hacer reaccionar una corriente rica de olefinas en combinación con una corriente de isobutanos, la reacción se lleva a cabo en presencia de ácido fluorhídrico (HF) como catalizador, que con excepción de muy pequeñas cantidades en la alimentación este catalizador no es consumido.



En el proceso de alquilación se consideran las siguientes secciones:

- Sección de Hidrisom.
- Sección de Alimentación de Hidrocarburos.
- Sección de Reacción.
- Sección de Redestilación Ácida.
- Sección de Fraccionamiento y Tratamiento de Productos.
- Sección de Desisobutanizadora.

SECCIÓN DE HIDRISOM

La finalidad de esta sección es el pretratamiento de la carga de butilenos proveniente de la Planta de Metil-Terbutil-Éter (MTBE), pasando esta corriente por un reactor donde las dos reacciones más importantes son por una lado, la conversión de butadieno a buteno y por otro la isomerización del 1-buteno a 2-buteno, también se eliminan las impurezas contenidas en la carga como lo son los compuestos oxigenados, compuestos ligeros y agua, los cuales contribuyen a la formación de subproductos no deseados denominados Aceites Solubles en Ácido (ASA's), estos compuestos consumen ácido fluorhídrico para su formación por lo que disminuye el rendimiento potencial del alquilado.



SECCIÓN DE ALIMENTACIÓN DE HIDROCARBUROS

En esta sección se mezclan las corrientes de alimentación para enviarse a la sección de reacción.

La corriente de olefinas proveniente de la sección de Hidrisom entra a esta sección en donde se combina con una corriente de isobutano de reposición. La mezcla se dirige hacia unos secadores que absorben el agua contenida en la mezcla olefinas-isobutano. La carga seca entra a un mezclador en donde se adiciona una corriente de isobutanos de recirculación, para que la mezcla se dirija finalmente hacia la sección de reacción.

SECCIÓN DE REACCIÓN

La mezcla de hidrocarburos que sale del mezclador se envía a los enfriadores donde se combina con el ácido fluorhídrico, la mezcla de hidrocarburos que sale se envía a un asentador, en donde se separa el ácido de los hidrocarburos reaccionados.

A las líneas de salida del domo de los enfriadores por las que circula la mezcla HF-hidrocarburos que van al asentador de ácido se les conoce como “tubos verticales ascendentes” o “reactores elevadores” y es en donde se llevan a cabo propiamente las reacciones de alquilación.

En el asentador los hidrocarburos se separan por la diferencia de densidades, quedando éstos en la parte superior mientras el HF, por su mayor densidad se acumula en el fondo, los hidrocarburos se extraen por la parte lateral del mismo y se envían a la sección de fraccionamiento.



SECCIÓN DE REDESTILACIÓN ÁCIDA

El propósito de esta sección es la de mantener el ácido fluorhídrico a la mayor pureza posible, este ácido con el uso se va degradando formando fluoruros orgánicos y ASA's, por lo que es necesario regenerarlo para eliminarle las impurezas. Esto se lleva a cabo en la columna redestiladora.

Por el fondo de la redestiladora las impurezas (agua y ASA's) salen para lavarse y neutralizarse cáusticamente, eliminando el ácido fluorhídrico que pueda contener.

SECCIÓN DE FRACCIONAMIENTO Y TRATAMIENTO DE PRODUCTOS

El fraccionador principal separa el efluente de hidrocarburos en propano, butano e isobutano del alquilado producto para enviarlos a almacenamiento. Las corrientes de propano y butano se purifican antes de enviarse como productos.

Por el domo de la fraccionadora se separa el propano y HF, por el medio el isobutano, en los primeros platos el butano y el alquilado producto se obtiene por el fondo.

SECCIÓN DE DESISOBUTANIZADORA

La finalidad de esta sección es obtener el isobutano que se utilizará en las diferentes unidades de alquilación.

La alimentación a esta sección consiste de una mezcla de butanos-butilenos, rica en isobutanos, la mezcla entra a límite de batería y fluye hacia la columna desisobutanizadora. Por el domo de la columna salen los vapores de isobutano, los cuales se condensan recibiendo el condensado en el tanque acumulador del domo de la desisobutanizadora. Una parte del líquido colectado en el acumulador se envía a almacenamiento, mientras la otra se retorna a la columna como reflujo.



Por el fondo de la columna, se obtiene la corriente de butanos-butilenos pobre en isobutano, la cual sufre un abatimiento de temperatura en el enfriador de n-butano, enviándose a límite de batería hacia la unidad de MTBE. En las figuras 3.1 y 3.2 se muestran los diagramas de bloques y de flujo de proceso de la Planta de Alquilación.

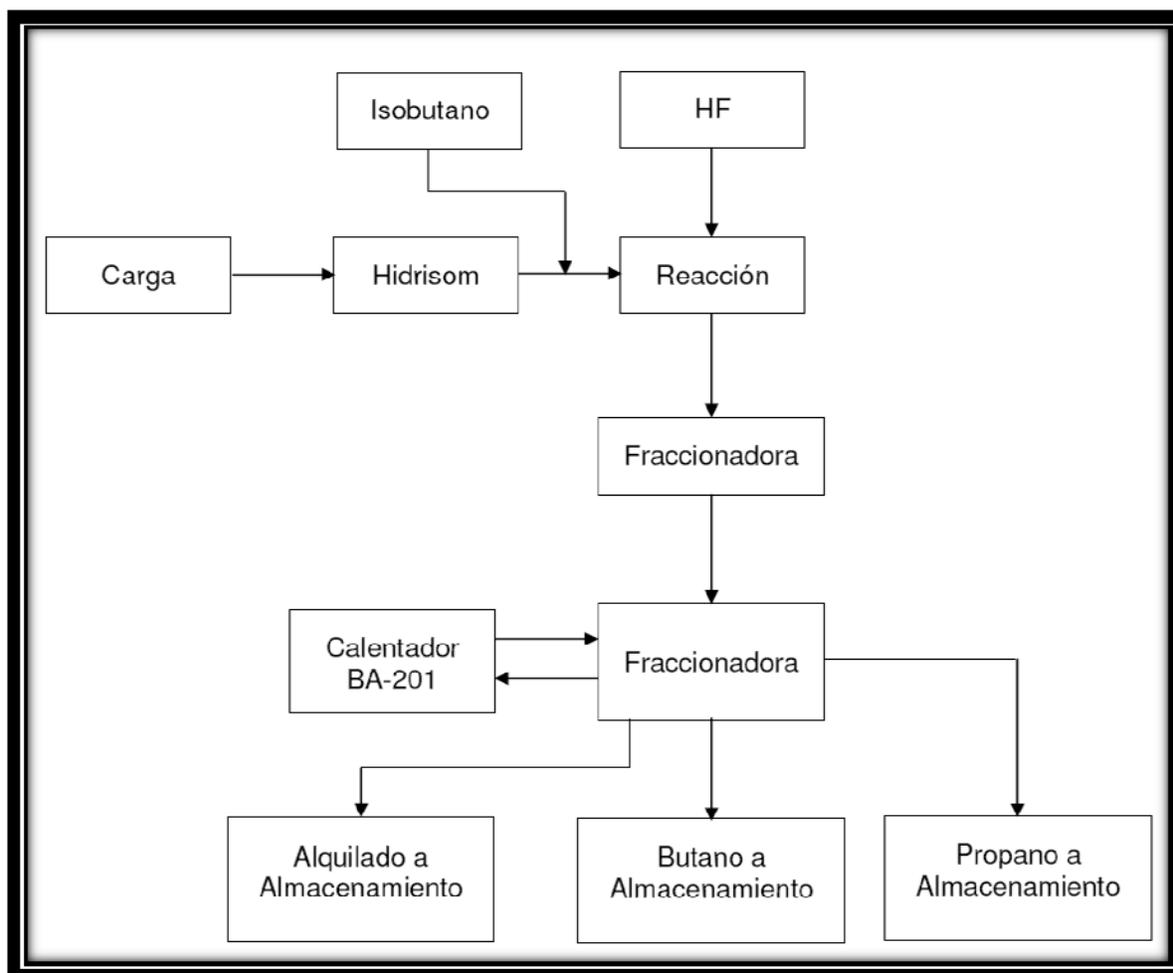


Figura 3.1 Diagrama de bloques de la Planta de Alquilación.

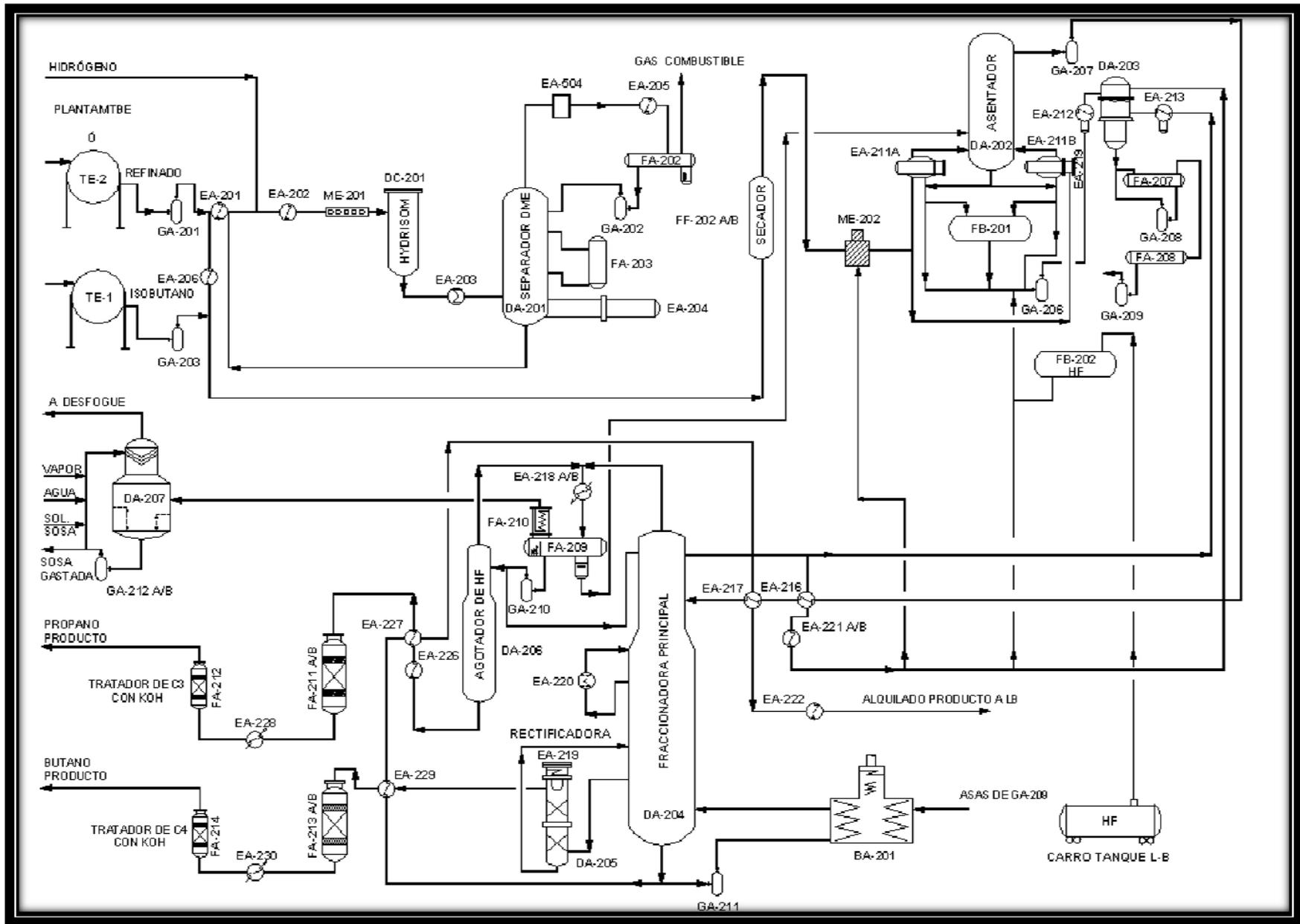


Figura 3.2 Diagrama de flujo de la Planta de Alquilación.



3.2 PROCEDIMIENTO PARA LA INSPECCIÓN DE ESPESORES (7,11, 12, 14, 15)

El siguiente procedimiento explica la forma en la cual se lleva a cabo actualmente el proceso de medición de espesores en los complejos petroquímicos de PEMEX.

3.2.1 PLANEACIÓN

Primero se divide la planta, unidad de proceso o instalación en circuitos, se les llama circuitos al conjunto de líneas y equipos que manejan un fluido de la misma composición, posteriormente éstos se subdividen en unidades de control (UC), que son secciones de circuitos que tienen una velocidad de desgaste más o menos homogénea .

Una vez que se han establecido las unidades de control se desarrolla el programa anual de medición de espesores en toda la planta, que es un documento en el cual se contempla la programación de inspección de espesores de toda la Refinería, esto con el fin de llevar un registro y examinar oportunamente en las fechas programadas.

3.2.2 MEDICIÓN EN CAMPO

Para llevar a cabo la medición es necesario contar con:

- Un aparato de medición de espesores, dentro de los modelos que existen actualmente en el mercado, se utiliza el DMS-2 modelo DA-302 como el que se observa en la figura 3.3, éste funciona bajo el fundamento ultrasónico y va acompañado de un fluido viscoso que es utilizado para permitir el paso de las ondas del transductor a la pieza inspeccionada llamado acoplante y un transductor.
- El isométrico de la unidad de control correspondiente, en el cual deben estar marcados los niveles de medición a revisar, también contiene datos del proceso como temperatura y presión de operación, además temperatura y presión máxima permisible, etc.



- El aparato de medición tiene la capacidad de almacenar lecturas de espesores, sin embargo también se puede utilizar para este fin el formato de registro de medición de espesores, ver Anexos C y D.



Figura 3.3 Aparato de medición ultrasónico DMS-2.

Antes de la medición en campo y una vez que se cuenta con los requerimientos anteriores se realizan las siguientes actividades:

- Se debe calibrar el aparato ultrasónico con un material igual al que posteriormente se le tomará la medición, también éste deberá estar en el mismo rango de temperatura de la tubería o del equipo a inspeccionar, todo esto con la finalidad de obtener una lectura más confiable.
- De acuerdo a la ubicación en la tubería los puntos de calibración varían dependiendo la ubicación del norte, la figura 3.4 muestra las posiciones a medir para tramos de tuberías, codos y tee's.

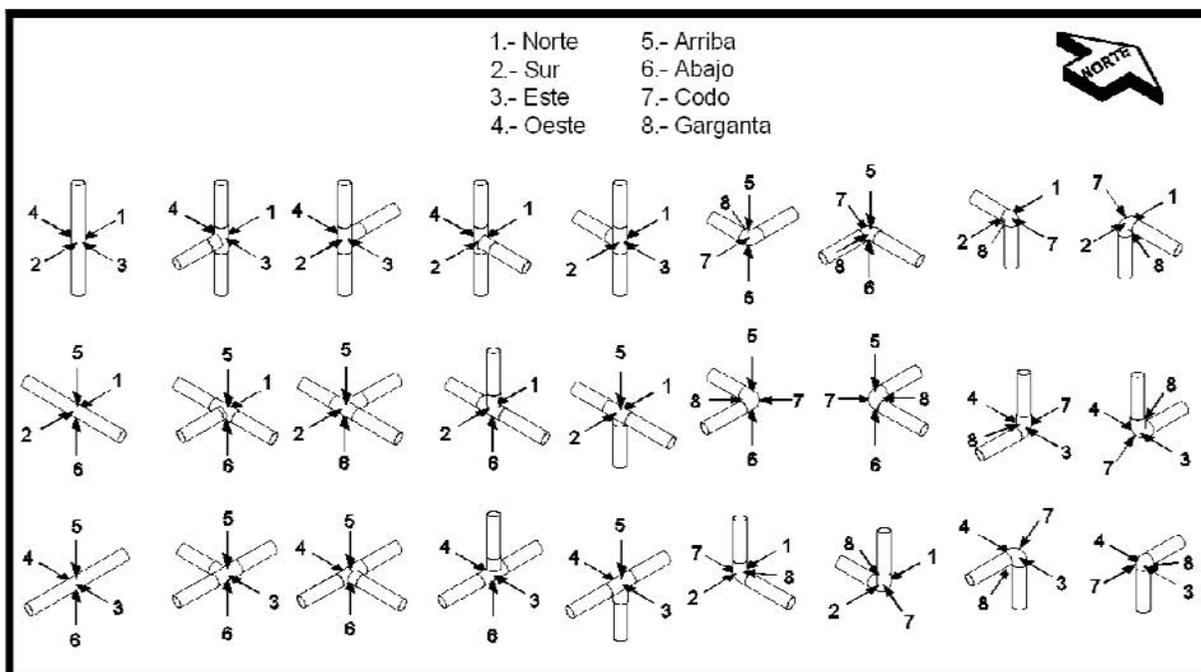


Figura 3.4. Localización de puntos de medición en tuberías y accesorios.

3.2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO POSTERIOR A LA MEDICIÓN (7, 11, 12, 14, 15)

Una vez que se ha realizado la medición de espesores en campo, se lleva a cabo el análisis estadístico formal en el cual se realizan cálculos matemáticos para obtener valores de gran importancia en la medición de espesores, el más importante de ellos la fecha de próxima medición.

Para realizar el análisis se utiliza el procedimiento descrito en el documento DG-GPASI-IT-0204 de PEMEX Refinación, el cual se muestra a continuación.

1. Discriminación de valores de espesores no significativos (se eliminarán las lecturas que tengan un espesor mayor al espesor nominal de la tubería).



2. Cálculo de velocidades de desgaste por punto:

$$d = \frac{e_i - e_f}{f_f - f_i} \quad \text{Ecuación (3.1)}$$

Donde:

d = Velocidad de desgaste por punto [in x 10⁻³ / año].

e_i = Espesor obtenido en la fecha anterior [in x 10⁻³].

e_f = Espesor obtenido en la fecha actual [in x 10⁻³].

f_f = Fecha de medición más reciente [años].

f_i = Fecha de medición anterior [años].

3. Cálculo de velocidades de desgaste promedio de la, o las unidades de control inspeccionadas:

$$\bar{D} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{n} \quad \text{Ecuación (3.2)}$$

Donde:

\bar{D} = Velocidad de desgaste promedio [in x 10⁻³ / año].

n = Número total de mediciones.

4. Cálculo de la velocidad de desgaste máxima ajustada estadísticamente:

$$\bar{D}_{max} = \bar{D} + 1.28 \frac{\bar{D}}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación (3.3)}$$

Donde:

\bar{D}_{max} = Velocidad de desgaste máxima ajustada estadísticamente [in x 10⁻³ / año].



NOTA: El valor de 1.28 de la fórmula proviene de las tablas de la T de Student y corresponde a un número de grados de libertad infinito y a un intervalo de confianza del 90% (valores fijados en la norma).

5. Selección del mínimo espesor de la inspección.
6. Obtención de la vida útil estimada, que va a ser referida al mínimo espesor seleccionado:

$$VUE = \frac{e_k - L_r}{\bar{D}_{max}} \quad \text{Ecuación (3.4)}$$

Donde:

VUE = Vida útil estimada [años].

e_k = Mínimo espesor encontrado durante la inspección [$\text{in} \times 10^{-3}$].

L_r = Límite de retiro [$\text{in} \times 10^{-3}$].

7. Obtención de la fecha de próxima medición de espesores:

$$FPME = f_k + \frac{VUE}{3} \quad \text{Ecuación (3.5)}$$

Donde:

$FPME$ = Fecha de próxima medición.

f_k = Fecha de última medición.

8. Obtención de la fecha de retiro probable:

$$FRP = f_k + VUE \quad \text{Ecuación (3.6)}$$

Donde:

FRP = Fecha de retiro probable.



3.2.4 GENERACIÓN DEL REPORTE

Después de calcular los parámetros citados en el punto anterior, el último paso a realizar es la generación del reporte de la inspección, un documento en el cual se muestra la memoria de cálculo y un resumen de los valores importantes resaltando la fecha de próxima medición.

3.3 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA DETERMINAR Y DAR TRATAMIENTO A LOS PUNTOS CRÍTICOS QUE RESULTAN DURANTE LAS INSPECCIONES

La problemática que representa las variaciones de las velocidades de desgaste dentro de una misma unidad de control es la causa principal de que las fechas próximas de medición resulten tan a corto plazo, esto se debe a que en los cálculos la velocidad de desgaste juega un papel esencial. En el presente trabajo se propone una nueva forma para analizar los puntos de medición que dentro de una misma unidad presenten un mayor desgaste, se pretende (sin que represente algún riesgo mayor) que las unidades puedan inspeccionarse en mayores lapsos de tiempo.

A continuación se describen los pasos a seguir para la metodología, la cual tiene como objetivo mejorar el análisis estadístico realizado actualmente.

1. Revisar que los valores de espesor reportados en la fecha más reciente de medición de cada punto de inspección se encuentre dentro de los parámetros siguientes:
 - Se eliminarán todos los puntos cuyo valor exceda en 20% el espesor nominal de la tubería por ser consideradas como lecturas mal tomadas.
 - A todos los puntos cuyas lecturas resulten mayores al espesor nominal pero se encuentren dentro del rango del 20% de exceso permitido, se les asignará como valor de la lectura el espesor nominal de la tubería, lo que indicará que la velocidad de corrosión de una fecha a otra es igual a cero.



2. Determinar la velocidad de desgaste (ecuación 3.1) para cada punto de calibración, valor que posteriormente servirá para calcular la velocidad de desgaste promedio de la unidad de control (ecuación 3.2).
3. Con los valores de las velocidades de desgaste obtenidos, se procede a calcular los parámetros conocidos como los “cinco valores”, éstos son: Mínimo valor, primer cuartil, mediana, tercer cuartil, máximo valor.
4. El procedimiento puede resultar más claro si se realiza una gráfica de caja con los valores de espesores que se inspeccionaron, en la cual se muestren los parámetros del punto anterior. Ver punto 2.6.2.2. “Gráfica de caja o de cuadro”.
5. Los valores de espesores se caracterizan en tres grupos:
 - a) Valores de velocidad de desgaste puntual que se encuentran dentro del límite permisible, estos se conocen como puntos con desgaste normal o puntos normales.
 - b) Valores cuya velocidad de desgaste puntual sea tal que esté por encima de los valores permitidos de desgaste, pero por debajo de los puntos extremadamente críticos, éstos se consideran como puntos medianamente críticos en inglés se les conoce como “*mild outliers*” (*MO*). De acuerdo a la nomenclatura utilizada en el capítulo II del presente trabajo, esto es:

$$Q_1 - 1.5 * IQR < MO > Q_3 + 1.5 * IQR$$

Dicho en otras palabras se considerará como puntos medianamente críticos a todos los valores que se encuentren por encima del tercer cuartil 1.5 veces el rango intercuartil.

- c) Valores cuya velocidad de desgaste puntual sea tal que se consideren como puntos extremadamente críticos, en inglés se les da el término de “*extreme outliers*” (*EO*).



$$Q_1 - 3 * IQR < EO > Q_3 + 3 * IQR$$

Dicho en otras palabras se considerará como puntos extremadamente críticos a todos los valores que se encuentren por encima del tercer cuartil 3 veces el rango intercuartil.

NOTA: En cuestiones de seguridad siempre se tiene que extremar precauciones, es por ello que en el presente estudio solo se toman dos grupos de valores, los puntos de medición con desgaste normal y los puntos de medición críticos, dentro de ellos se engloban a las lecturas que resulten como puntos con desgaste medianamente o extremadamente crítico.

6. Una vez que caracterizados los grupos de valores, los puntos que resultan con desgaste normal siguen el procedimiento descrito en el punto 3.2.3 (pág. 45) del presente trabajo.
7. En general en cualquier inspección de espesores, los puntos que resultan con desgaste crítico son pocos, por lo que el valor de “1.28” para calcular la velocidad de desgaste ajustada (ecuación 3.3), deja de ser una buena aproximación, lo que implica que el valor de la constante deberá ser calculado para cada caso dependiendo del número de lecturas críticas, para ello se utilizan las tablas de la T de Student. Por lo demás los parámetros de Vida Útil Estimada (VUE), Fecha Próxima de Medición de Espesores (FPME) y Fecha de Retiro Probable (FRP) se calculan de la misma manera que los puntos que presentan desgaste normal.
8. Una vez realizado los pasos anteriores se obtendrán dos fechas de próxima inspección, una que represente a los puntos con desgaste crítico y otra representativa de los puntos con desgaste normal cada una de ellas será mucho más representativa del grupo de valores a los que pertenecen, con esto se trata de evitar, en la medida de lo posible, la inspección de niveles que no lo necesiten.



3.4 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para observar los resultados que se obtenían a partir de las mejoras propuestas al análisis estadístico, se realizó el estudio en unidades de control de la Planta de Alquileración en la Refinería “Ing. Antonio M. Amor” en Salamanca, Gto. La Planta cuenta con cientos de líneas de tuberías de proceso que están divididas en unidades de control, las unidades se seleccionaron bajo los siguientes criterios:

- Se seleccionaron aquellas unidades de control que contaban con el historial de las inspecciones hasta ese momento realizadas, ya que éste era completo y confiable.
- Las unidades de control que fueran seleccionadas contarían con un mínimo de 32% de sus niveles calibrados, que es el mínimo número de lecturas necesarias para que estadísticamente los resultados sean confiables.
- También era necesario que en la unidad de control no hubieran existido emplazamientos o cambios de diseño, esto permite tener un mejor seguimiento a cada uno de los niveles de calibración.
- Por último, se necesitaba que la unidad de control fuera representativa de la Planta de Alquileración, es decir, que en ella existieran variadas velocidades de corrosión en los niveles.

Bajo los criterios antes citados, se seleccionaron las unidades de control 39 y la 25 de la Planta de Alquileración, la unidad de control 39 se ubica en el circuito de recirculación de isobutano y que es la línea que va del intercambiador EA-221A y EA-216, ver Anexos A y B. La unidad de control cuenta con 10 niveles de calibración de tubería. La temperatura y presión con que opera la unidad de control son 77 °C y 285 PSIG, respectivamente.



La unidad de control 25 que está ubicada en el circuito perteneciente al reflujo de domos de la fraccionadora principal, cuenta con 100 niveles de calibración de tubería, ver Anexo B. La temperatura y presión con que opera la unidad de control son 43 °C y 370 PSIG, respectivamente. Esta unidad de control transporta el propano producto condensado proveniente de la fraccionadora.

En los Anexos C y D se muestran los registros de medición de espesores de las dos unidades de control antes citadas, en él se encuentra el listado de las inspecciones más recientes de cada uno de los niveles de calibración con la velocidad de corrosión calculada para cada punto.

3.4.1 CONSIDERACIONES REALIZADAS

Cuando se presentan variaciones en la velocidad de desgaste de una fecha a otra se debe seguir el siguiente criterio:

1. Cuando el cambio sea en sentido de aumentar la velocidad de desgaste, se toma en cuenta el valor obtenido en el último análisis.
2. Cuando el cambio es el sentido de disminuir la velocidad de desgaste, se toma en cuenta el valor obtenido en el análisis anterior, hasta tener cuando menos dos análisis consecutivos que confirmen el cambio observado.

Sin embargo, respecto al criterio 2, cuando éste se empleó en el análisis de espesores los resultados observados no fueron lo esperado, esto es debido a que cuando en una inspección se presentan valores de espesores altos, éstos continúan predominando para las posteriores calibraciones, por lo que las inspecciones más recientes resultan con valores de inspección anteriores. Inclusive se presentaron casos en los que la última inspección contenía valores registrados en la primera, todo esto debido a que las inspecciones no siguen un desgaste progresivo, o dicho de otra manera, no siguen un ritmo de desgaste continuo. Por lo tanto los valores que en una inspección pueden estar con un grado de desgaste excesivo, a la siguiente pueden presentar el fenómeno de engrosamiento. Por este motivo se decidió no emplearlo en el análisis mostrado a continuación.



Una vez que la inspección fue realizada en campo y se cuenta con los valores de espesores de cada nivel de medición se procede a realizar el análisis estadístico posterior.

3.4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO POSTERIOR A LA INSPECCIÓN

El análisis se realiza de acuerdo al documento antes mencionado DG-GPASI-IT-0204, que a su vez está basado en los códigos ASME B31.3-2002 y API 570.

En la actualidad, al momento de realizar los cálculos posteriores a la calibración de espesores, estos se hacen sin diferenciar si los puntos presentan un alto desgaste o por el contrario su desgaste es mínimo, por este motivo todos los valores que resulten de la evaluación de: VUE, FPME, FRP, que se refieren al grupo de niveles que conforman una unidad de control resultan no ser representativos de toda ella, lo que se propone en el presente trabajo es que estos dos tipos de puntos se puedan tratar por separado.

En la literatura referente a este tema se menciona el término de cuartiles para diferenciar datos que se encuentran fuera de la media de la población, esta división se utilizará para determinar la criticidad de los puntos que resultarán ser aquellos con un valor de corrosión puntual mayor al promedio. Con esta manera estadísticamente correcta se evita el error que resultaría si se designara arbitrariamente.

Resumiendo, se calculará la velocidad de corrosión de cada punto de medición, a los valores obtenidos se les realizará el análisis mostrado en el punto 2.6.2.2 para determinar cuales de ellos tienen un desgaste crítico, de esta manera se obtendrán dos conjuntos de valores, las lecturas con desgaste crítico serán aquellas que excedan 1.5 veces el rango intercuartil.

A diferencia de la manera en que actualmente se realiza, cada conjunto de valores contará con su propio análisis estadístico por lo que se obtendrán dos parejas de valores para VUE y FPME uno que representará al conjunto de puntos normales y



otro que representará al conjunto de puntos críticos. Las tablas 3.1 a 3.4 muestran el resumen de los “5 valores” de la inspección de espesores más reciente de las dos unidades de control, posteriormente en las figuras 3.5 a 3.8 se muestran las gráficas de cuadro de dichos valores.

Tabla 3.1 Valores estadísticos de la UC-ALK-039 de la inspección realizada en Mayo-05.

Valor mínimo	0
Primer cuartil (Q_1)	1.5
Mediana	4.6
Tercer cuartil (Q_3)	4.6
Valor máximo	27.7
Rango intercuartil (IQR)	3.1
Puntos atípicos (<i>Outliers</i>)	9.2,9.2,13.8,18.4,23.0,27.7

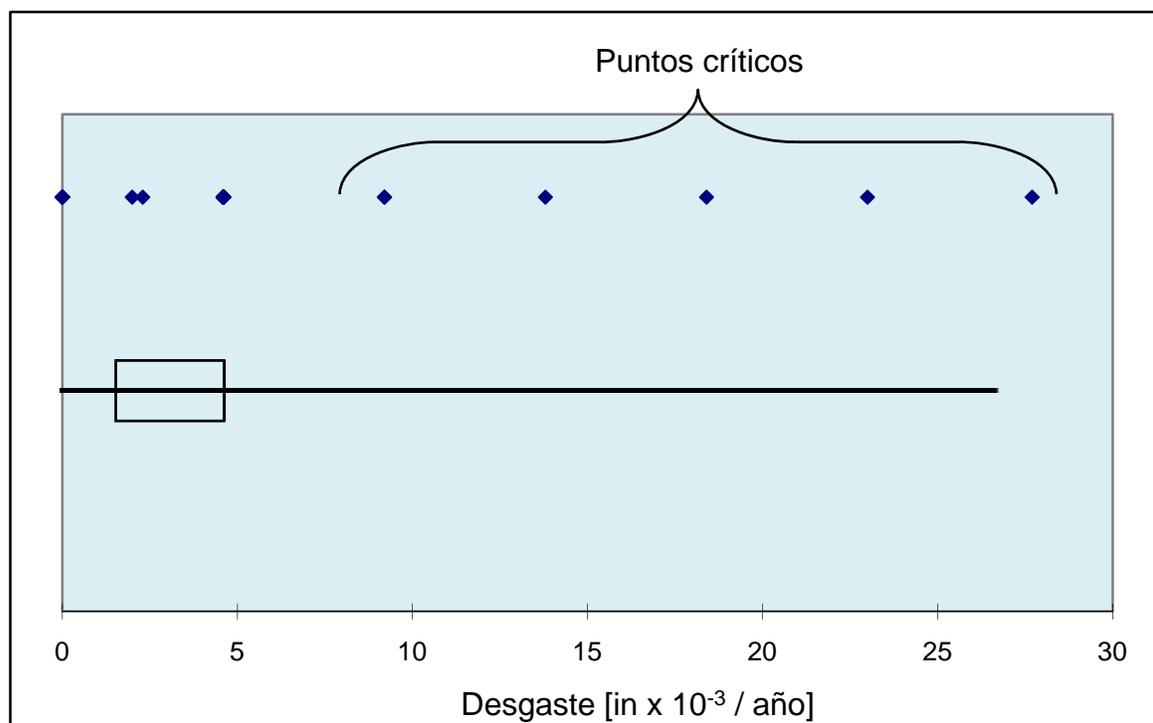


Figura 3.5 Dispersión de los valores de espesor medidos de la UC-ALK-039 en la inspección realizada en Mayo-05.



Tabla 3.2 Valores estadísticos de la UC-ALK-025 de la inspección realizada en Enero-05 (tubería de 8 pulgadas).

Valor mínimo	0
Primer cuartil (Q_1)	1.9
Mediana	4.1
Tercer cuartil (Q_3)	6
Valor máximo	26.6
Rango intercuartil (IQR)	4.1
Puntos atípicos (<i>Outliers</i>)	13.1,16.1,26.6

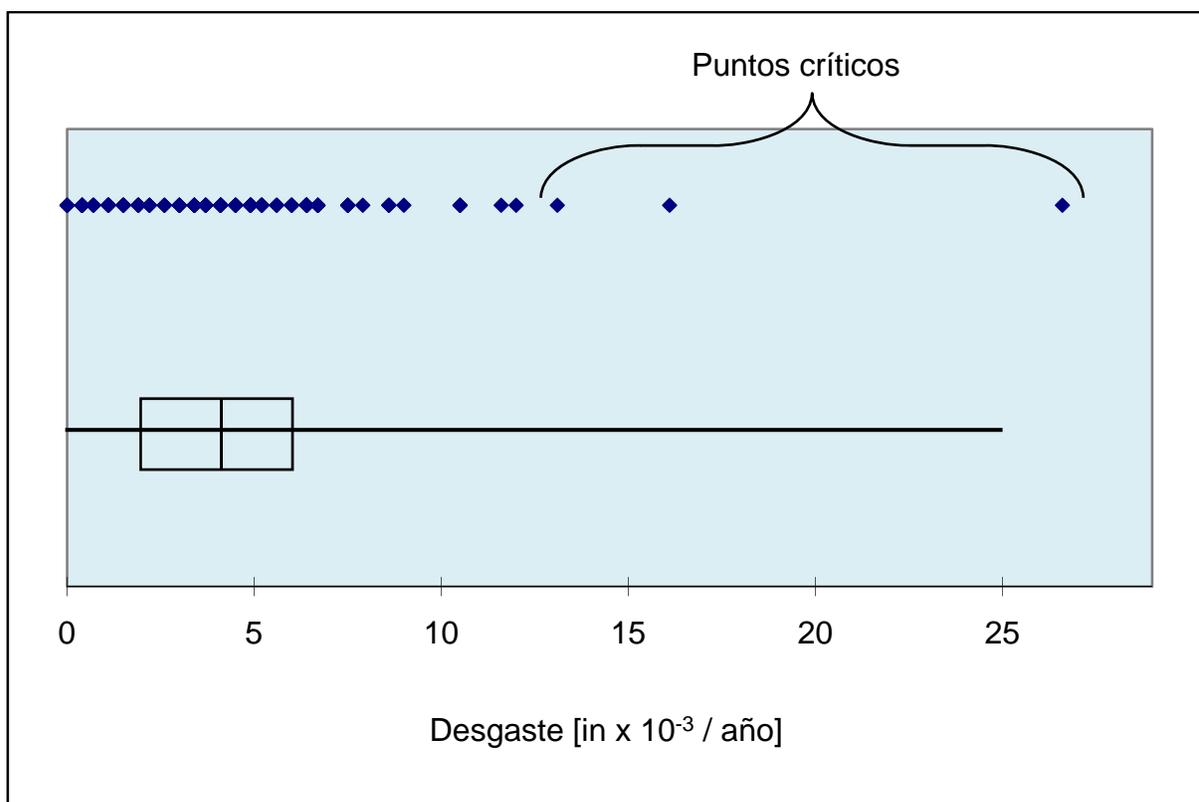


Figura 3.6 Dispersión de las lecturas de 8 pulgadas tomadas de la UC-ALK-025 en la inspección realizada en Enero-05.



Tabla 3.3 Valores estadísticos de la UC-ALK-025 de la inspección realizada en Enero-05 (tubería de 2 pulgadas).

Valor mínimo	0
Primer cuartil (Q_1)	1.9
Mediana	3.4
Tercer cuartil (Q_3)	5.2
Valor máximo	17.2
Rango intercuartil (IQR)	3.3
Puntos atípicos (<i>Outliers</i>)	10.8,12.0,15.0,17.2

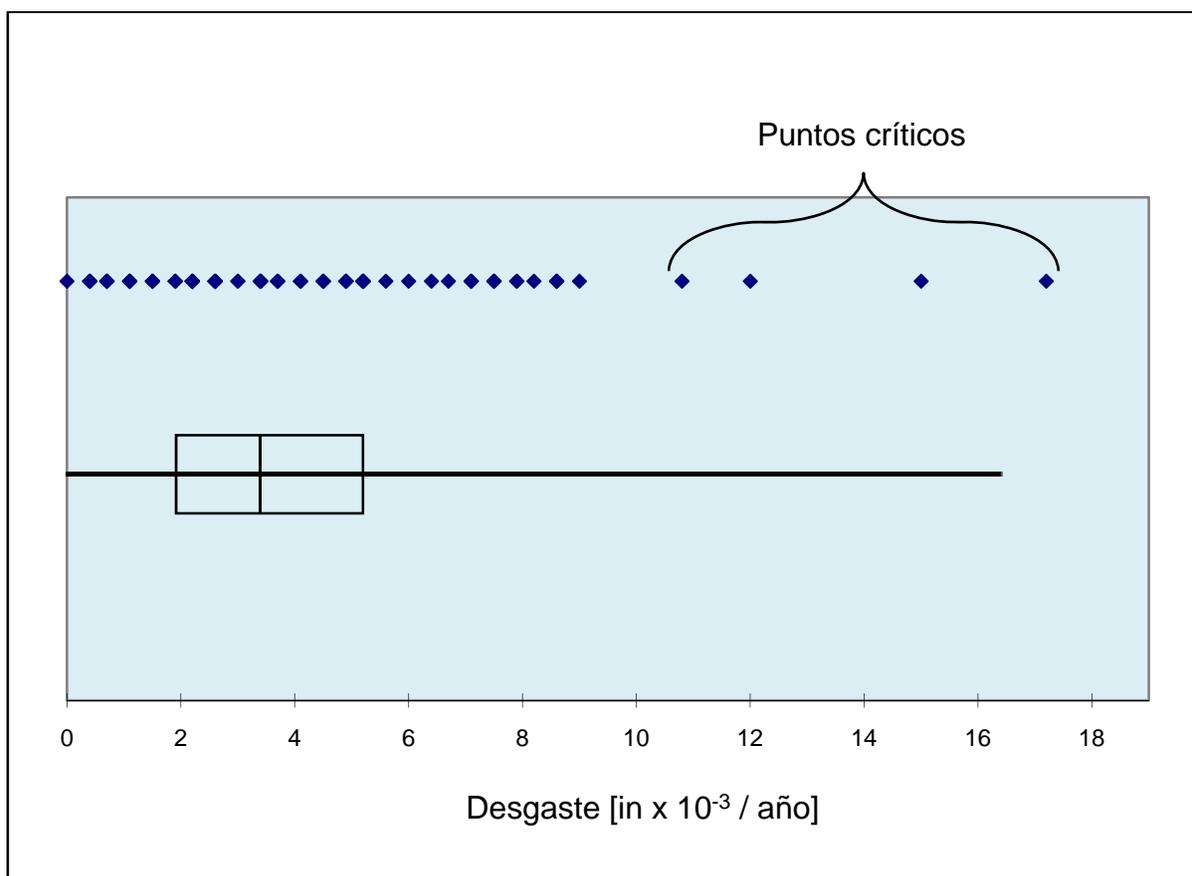


Figura 3.7 Dispersión de las lecturas de 2 pulgadas tomadas de la UC-ALK-025 en la inspección realizada en Enero-05.



Tabla 3.4 Valores estadísticos de la UC-ALK-025 de la inspección realizada en Enero-05
(tubería de 1.5 pulgadas).

Valor mínimo	0
Primer cuartil (Q_1)	1.5
Mediana	3.0
Tercer cuartil (Q_3)	4.2
Valor máximo	13.8
Rango intercuartil (IQR)	2.7
Puntos atípicos (<i>Outliers</i>)	8.2, 10.1, 13.8

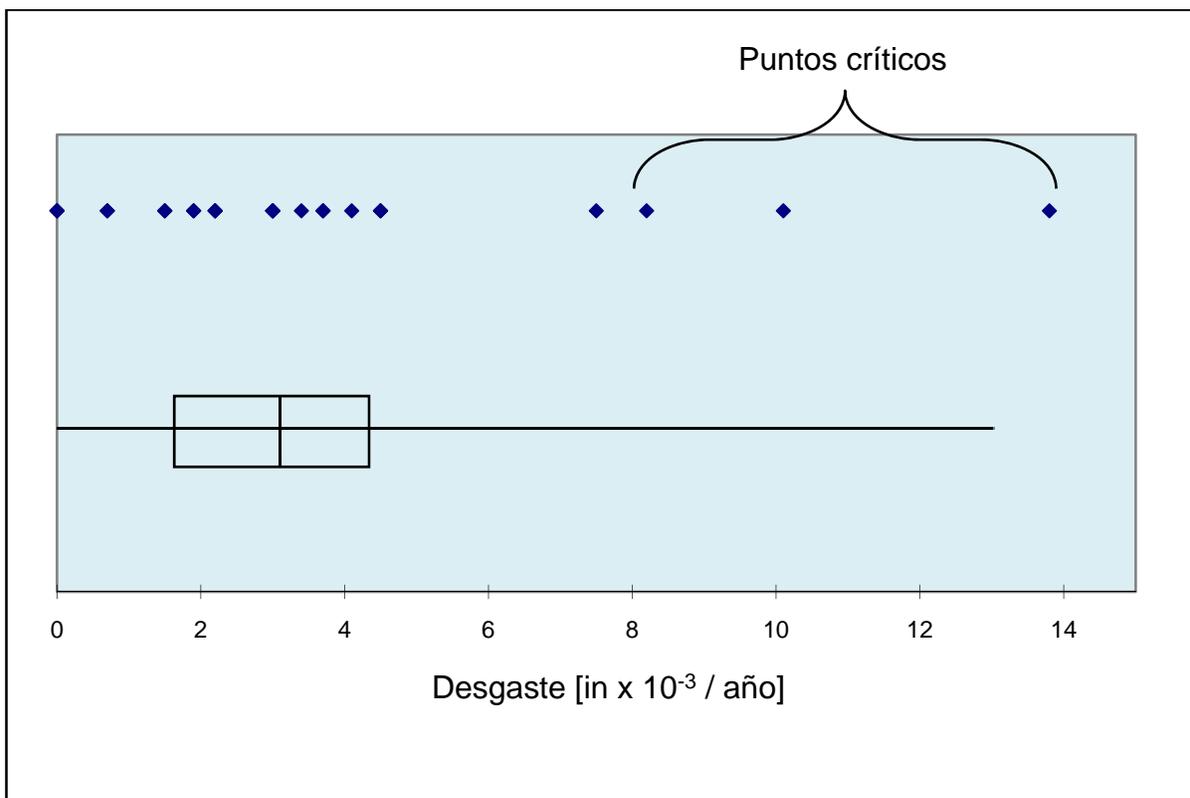


Figura 3.8 Dispersión de las lecturas de 1.5 pulgadas tomadas de la UC-ALK-025 en la inspección realizada en Enero-05.



Una vez que fueron diferenciados los puntos con desgaste crítico que resultan de la inspección más reciente, cada uno de los grupos de valores, normales y atípicos se analizan por separado.

La memoria de cálculo del análisis de espesores se realizó en Excel, las tablas 3.5 a 3.8 muestran en detalle los puntos clasificados como críticos.

Tabla 3.5 Puntos críticos de la UC-ALK-039 en la inspección de Mayo-2005.

NIVELES CON PUNTOS CRÍTICOS	DIÁMETRO NOMINAL [in], ESPESOR ORIGINAL [in x 10 ⁻³]	LÍMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	POSICIÓN	INSPECCIÓN Mar-03 [in x 10 ⁻³]	INSPECCIÓN Ene-05 [in x 10 ⁻³]	ESPESOR REMANENTE [in x 10 ⁻³]	DESGASTE ANUAL [in x 10 ⁻³ / año]
2	10	190	NORTE	370	365	175	2.3
			SUR	400	400	210	0.0
	365		CODO	360	360	170	0.0
			GARGANTA	350	320	130	13.8
3	10	190	NORTE	320	310	120	4.6
			SUR	300	290	100	4.6
	365		ORIENTE	350	310	120	18.4
			PONIENTE	310	300	110	4.6
4	10	190	ORIENTE	320	310	120	4.6
			PONIENTE	300	290	100	4.6
	365		ARRIBA	310	300	110	4.6
			ABAJO	310	290	100	9.2
5	10	190	ORIENTE	320	310	120	4.6
			PONIENTE	340	330	140	4.6
	365		CODO	330	320	130	4.6
			GARGANTA	310	250	60	27.7
6	10	190	NORTE	400	390	200	4.6
			SUR	350	340	150	4.6
	365		CODO	400	390	200	4.6
			GARGANTA	400	350	160	23.0
7	10	190	NORTE	320	300	110	9.2
			SUR	310	300	110	4.6
	365		ARRIBA	320	310	120	4.6
			ABAJO	310	300	110	4.6



Tabla 3.6 Puntos críticos de la UC-ALK-025 en la inspección de Mayo-2005 para el diámetro de 8 pulgadas.

NIVELES CON PUNTOS CRÍTICOS	DIÁMETRO NOMINAL [in], ESPESOR ORIGINAL [in x 10 ⁻³]	LÍMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	POSICIÓN	INSPECCIÓN Mar-03 [in x 10 ⁻³]	INSPECCIÓN Ene-05 [in x 10 ⁻³]	ESPESOR REMANENTE [in x 10 ⁻³]	DESGASTE ANUAL [in x 10 ⁻³ / año]
19	8	180	ORIENTE	329	315	165	5.2
			PONIENTE	358	370	220	
	322		CODO	378	335	185	16.1
			GARGANTA	327	320	170	2.6
34	8	180	NORTE	381	310	160	26.6
			SUR	351	345	195	2.2
	322		CODO	346	330	180	6.0
			GARGANTA	342	345	195	
45	8	180	NORTE	335	300	150	13.1
			SUR	313	285	135	10.5
	322		ORIENTE	321	300	150	7.9
			PONIENTE	328	300	150	10.5

Tabla 3.7 Puntos críticos de la UC-ALK-025 en la inspección de Mayo-2005 para el diámetro de 2 pulgadas.

NIVELES CON PUNTOS CRÍTICOS	DIÁMETRO NOMINAL [in], ESPESOR ORIGINAL [in x 10 ⁻³]	LÍMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	POSICIÓN	INSPECCIÓN Mar-03 [in x 10 ⁻³]	INSPECCIÓN Ene-05 [in x 10 ⁻³]	ESPESOR REMANENTE [in x 10 ⁻³]	DESGASTE ANUAL [in x 10 ⁻³ / año]
71	2	100	ORIENTE	196	180	80	6.0
			PONIENTE	194	170	70	9.0
	218		ARRIBA	200	160	60	15.0
			ABAJO	193	170	70	8.6
74	2	100	NORTE	188	215	115	
			SUR	217	185	85	12.0
	218		CODO	169	160	60	3.4
			GARGANTA	202	230	130	
81	2	100	ORIENTE	190	185	85	1.9
			PONIENTE	186	175	75	4.1
	218		ARRIBA	189	160	60	10.8
			ABAJO	184	185	85	
97	2	100	NORTE	237	230	130	2.6
			SUR	231	230	130	0.4
	218		CODO	226	180	80	17.2
			GARGANTA	230	240	140	



Tabla 3.8 Puntos críticos de la UC-ALK-025 en la inspección de Mayo-2005 para el diámetro de 1.5 pulgadas.

NIVELES CON PUNTOS CRÍTICOS	DIÁMETRO NOMINAL [in], ESPESOR ORIGINAL [in x 10 ⁻³]	LÍMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	POSICIÓN	INSPECCIÓN Mar-03 [in x 10 ⁻³]	INSPECCIÓN Ene-05 [in x 10 ⁻³]	ESPELOR REMANENTE [in x 10 ⁻³]	DESGASTE ANUAL [in x 10 ⁻³ / año]
65	1.5	100	NORTE	160	150	50	3.7
			SUR	161	150	50	4.1
	200		CODO	162	125	25	13.8
			GARGANTA	168	160	60	3.0
67	1.5	100	ORIENTE	165	160	60	1.9
			PONIENTE	172	160	60	4.5
	200		CODO	162	135	35	10.1
			GARGANTA	172	150	50	8.2



CAPÍTULO 4

RESULTADOS





4. RESULTADOS

Como se planteó en un inicio, se llevaron a cabo las mejoras al procedimiento actualmente utilizado para determinar las fechas de próxima inspección en Refinerías de PEMEX, esto se llevo a cabo diferenciando en el análisis estadístico entre puntos con desgaste normal y crítico.

Para revisar las mejoras obtenidas a partir de la metodología propuesta se realizó el análisis a dos unidades de control existentes en una Refinería de PEMEX, éstas debían de contar con su historial completo sobre las calibraciones efectuadas, una debía contar con pocos niveles de medición y la otra unidad debía contar con un mayor número de niveles, con el fin de demostrar los beneficios la metodología presentada.

Las unidades de control 39 y 25 de la Planta de Alquiler fueron dos unidades que cumplieron con estos requerimientos, por lo tanto fueron las unidades seleccionadas. Las figuras 4.1 y 4.2 muestran las gráficas de distribución de las velocidades de desgaste anual de estas unidades de control, en ellas se puede observar la oscilación que presentan las velocidades de corrosión aunque las tuberías estén constituidas del mismo material.

Debido a estas oscilaciones en las velocidades de desgaste el análisis estadístico resulta poco confiable y es la razón por la cual las inspecciones deben realizarse más de dos veces en un periodo de 5 años, esto repercute en un excesivo gasto para la Refinería sobretodo si es posible que mejorando la calidad del análisis se favorezca la reducción de costos, sin disminuir el nivel de seguridad en la instalación.

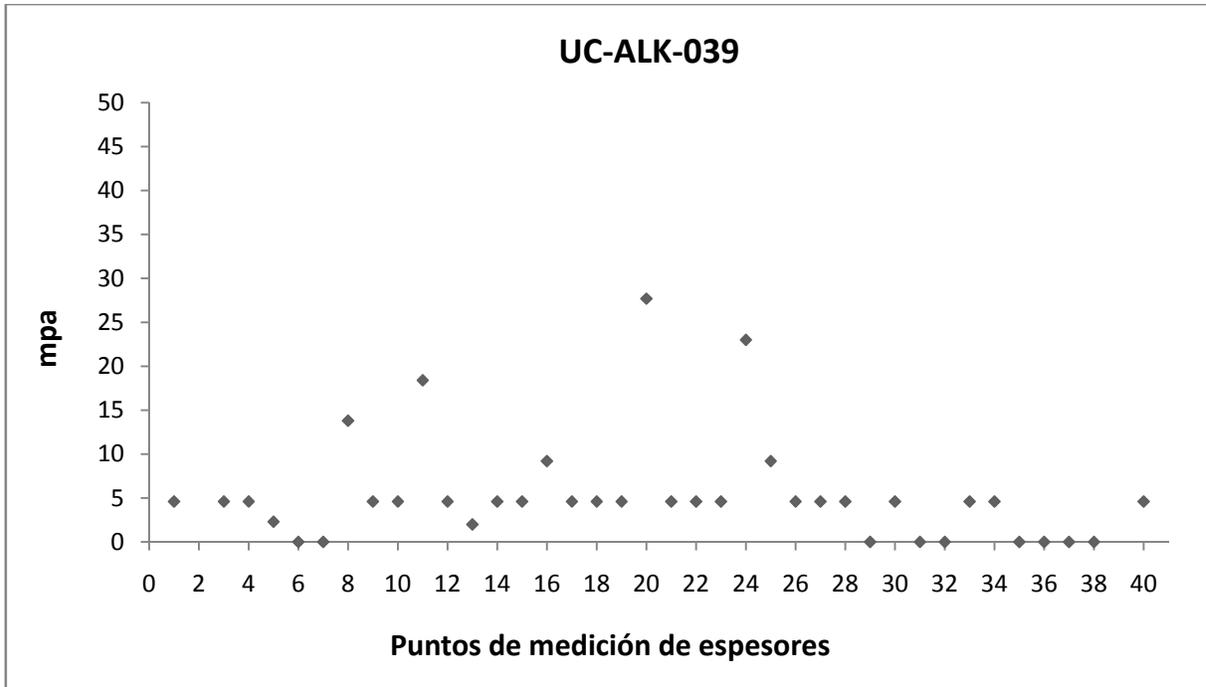


Figura 4.1 Distribución de las velocidades de desgaste en la última inspección de la UC-ALK-039.

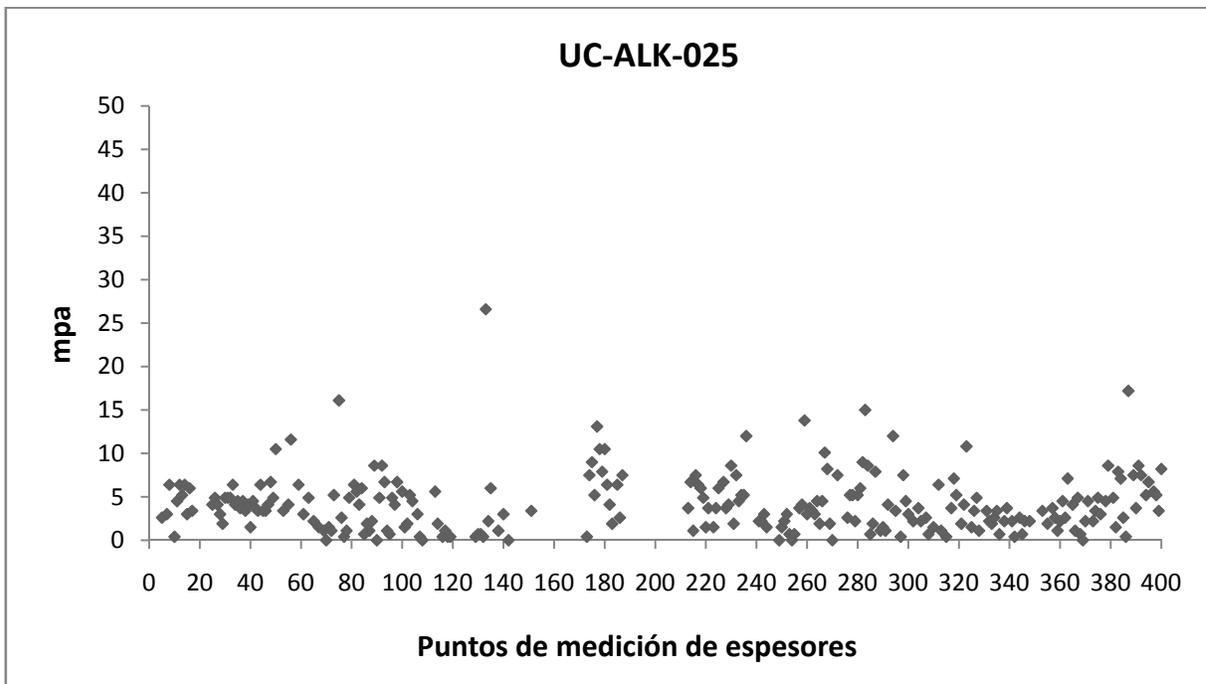


Figura 4.2 Distribución de las velocidades de desgaste en la última inspección de la UC-ALK-025.



4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El parámetro principal para determinar si con la metodología propuesta se obtienen los resultados esperados es la fecha de próxima medición, es por ello que se realizó el análisis estadístico de la manera en que se lleva a cabo actualmente en la Refinería, para poder cotejar los resultados obtenidos mediante los dos métodos. Los resultados a partir de realizar el análisis de la forma en la que se lleva a cabo actualmente se muestran en la tabla 4.1 y en la tabla 4.2 mediante la metodología propuesta.

En el Anexo E se presenta la memoria de cálculo realizada para la unidad de control 25, en la cual se observa el resumen de los parámetros necesarios para obtener finalmente la fecha de la próxima inspección.

Tabla 4.1 Fecha de próxima inspección de espesores mediante la metodología actual para las unidades de control 39 y 25.

UC-ALK-039			
<i>Diámetro de la tubería (in)</i>	<i>FPME Calculada</i>	<i>Plazo para próxima inspección (años)</i>	<i>Puntos a inspeccionar</i>
10	May-2008	3.1	40

UC-ALK-025			
<i>Diámetro de la tubería (in)</i>	<i>FPME Calculada</i>	<i>Plazo para próxima inspección (años)</i>	<i>Puntos a inspeccionar</i>
1.5, 2, 8	Nov-2006	1.9	400



Tabla 4.2 Fecha de próxima inspección de espesores de las unidades de control 39 y 25 mediante la metodología propuesta.

UC-ALK-039			
<i>Puntos de medición</i>	<i>FPME Calculada</i>	<i>Plazo para próxima inspección (años)</i>	<i>Puntos a inspeccionar</i>
Normales	Sep-2013	5	16
Críticos	Abr-06	0.9	24

UC-ALK-025			
<i>Puntos de medición</i>	<i>FPME Calculada</i>	<i>Plazo para próxima inspección (años)</i>	<i>Puntos a inspeccionar</i>
Normales	Ene-2009	4	364
Críticos	Ago-2005	0.6	36

En la normatividad de PEMEX, en el documento DG-GPASI-IT-0204 en su apartado 9.8.3 indica que la fecha de próxima medición de espesores será aquella que resulte más cercana para los diferentes diámetros que integran la unidad de control, en el caso de que la unidad de control solo cuente con tubería de un determinado diámetro, como es el caso de la unidad de control 39, la fecha de próxima medición será aquella que resulte para dicho diámetro.

Analizando la forma de determinar la fecha de próxima inspección existente se puede observar que la unidad de control 39 será inspeccionada en Mayo del 2008 y mediante la metodología propuesta, solo los puntos críticos se inspeccionaran en Abril del 2006 y los puntos con desgaste normal se mandarán a inspeccionar en el periodo máximo permitido que es de 5 años, esto es, Mayo del 2010.



Con respecto a la unidad de control 25, se puede mencionar que en lugar de inspeccionar la totalidad de puntos de medición que conforman la unidad de control en Noviembre-2006, mediante la metodología propuesta, la inspección se realizará en Enero-2009 para puntos normales y solo los puntos críticos en Agosto del 2005.

Es poco probable que una unidad de control en cualquier refinería conste únicamente de un diámetro de tubería, por lo que en la tabla 4.3 se presenta el desglose por diámetros que se tienen de la unidad de control 25, en esta se puede observar las diferentes fechas de próxima medición para cada diámetro.

Tabla 4.3 Desglose por diámetros de la última inspección de la UC-ALK-025.

Puntos normales			
<i>Diámetro de la tubería (in)</i>	<i>FPME Calculada</i>	<i>FPME en (años)</i>	<i>Puntos a inspeccionar</i>
1.5	Feb-2010	5	28
2	Ene-2009	4	112
8	Oct-2009	4.8	224

Puntos críticos			
<i>Diámetro de la tubería [in]</i>	<i>FPME Calculada</i>	<i>FPME en (años)</i>	<i>Puntos a inspeccionar</i>
1.5	Ago-2005	0.6	8
2	Mar-2006	1.2	16
8	Jul-2006	1.5	12



4.2 BENEFICIOS ECONÓMICOS DE UN BUEN ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN LAS INSPECCIONES DE ESPESORES.

No obstante la mejora en la seguridad de las instalaciones al poder monitorear por separado los puntos con desgaste críticos y los puntos con desgaste normal que resultan de una inspección, éstas mejoras también conllevan beneficios económicos al tener que inspeccionar solamente los puntos críticos, evitando la medición de puntos que no lo requieren.

En cualquier plan de mejora es importante hacer notar los beneficios económicos que se esperan, debido a que si ésta no resultara costeable su instauración en cualquier instalación de proceso se vería dificultada.

Generalmente el mismo personal de la Refinería es el encargado de realizar las inspecciones de espesores, sin embargo en ocasiones esta labor se destina a empresas especializadas en éste rubro, las cuales en promedio cobran por cada punto de medición aproximadamente \$30.00 M.N., este valor puede variar si la tubería se encuentra forrada o a una determinada temperatura o ubicada a una altura mayor que sobre el nivel del suelo.

Para estudiar los beneficios económicos de la instauración de la nueva metodología en plantas de proceso, se escogió la unidad de control 25 por contar con un mayor número de niveles de medición que la unidad de control 039 por lo que los resultados se pueden apreciar más significativamente. La Refinería mandó a inspeccionar la unidad de control en Noviembre del 2006 esto es:

$$\text{Puntos de medición} = 100 \text{ niveles} * 4 \text{ puntos/nivel} = 400$$

$$\text{Costo de medición} = 400 * \$30 = \$12\ 000$$

Y al ritmo que se inspeccionan que es de por lo menos cada dos años, tenemos que la unidad de control se inspeccionará hasta 2.5 veces en el periodo de 5 años, esto sería:



$$\text{Costo a 5 años} = \$12\,000 * 2.5 = \$30\,000$$

En cambio mediante la nueva metodología que consiste en inspeccionar por separado puntos con desgaste crítico y puntos desgaste normal.

El costo para los puntos críticos de la inspección que se llevaría cabo en Agosto-2005:

$$\text{Costo de medición} = 36 * \$30 = \$1\,080$$

En promedio los puntos críticos que resultan de una inspección deberán calibrarse cada año y asumiendo que el número de puntos críticos de una medición a otra sea constante, esto sería:

$$\text{Costo de medición} = \$1\,080 * 5 = \$5\,400$$

Para los puntos normales la inspección se realizará en Enero-2009 y el costo será:

$$\text{Costo de medición} = 368 * \$30 = \$11\,040$$

Si la inspección de los puntos normales resulta cada 4 años, el costo a los 5 años sería de:

$$\text{Costo a 5 años} = \$11\,040 * 1.25 = \$13\,800$$

Sumando el costo de inspeccionar tanto puntos críticos como puntos normales, esto es:

$$\text{Costo total a 5 años} = \$5\,400 + \$13\,800 = \$19\,200$$

En la tabla 4.4 se muestra el resumen de los costos estimados obtenidos mediante las dos metodologías.



Tabla 4.4 Comparación de los costos estimados de las dos metodologías.

<i>Metodología</i>	<i>Costo estimado a 5 años</i>	<i>Ahorro</i>
Actual	\$ 30,030 MN	
Propuesta	\$19,200 MN	36%

Se debe tener en cuenta que los resultados antes presentados son un aproximación y que solo corresponden a la unidad de control 25 de la Planta de Alquiler, dicha Planta cuenta con aproximadamente 120 unidades de control y en la Refinería existen cerca de 4000 unidades de control, todas ellas presentarían la misma oportunidad de mejora en sus respectivas fechas de inspección, con lo que los costos serían más reveladores.



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES





5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se implementó el nuevo procedimiento para detectar y dar seguimiento a los puntos considerados como críticos que resultan de las inspecciones de espesores, esto es una mejora al sistema ya existente de medición de espesores SIMECELE que se encuentra ya implementado en una refinería perteneciente a PEMEX.
- Para evaluar los resultados que estas mejoras presentaban en la práctica, se trabajó con unidades de control de la Refinería, los resultados permitieron la implementación de la metodología en toda la Planta.
- Es de suma importancia hacer un análisis minucioso de los puntos considerados como no significativos, ya que si este paso no se realiza de una forma responsable y con criterios bien establecidos, existe la posibilidad de pasar por alto puntos críticos donde la disminución excesiva del espesor es debida al desgaste y no un error de lectura, la norma en este punto es poco clara.
- El tratar a todos los puntos por igual da como resultado fechas de próxima medición poco representativas de las condiciones de la línea, en cambio al hacer el análisis estadístico en el que se trata por separado a los puntos con desgaste normal y a los puntos con desgaste excesivo se obtienen dos fechas de próxima medición. Una para niveles normales (5 años) y otra para niveles críticos (antes de 5 años).
- El realizar el ajuste de la fecha próxima de inspección repercute en que no se realicen mediciones de puntos que no lo requieran y con esto se disminuyen las horas-hombre destinadas para esta actividad.



- Debido a que el desgaste de tuberías y equipos es un problema complejo e imposible de erradicar, se entiende la importancia que debe tener el control y monitoreo de espesores en tuberías y equipos en cualquier tipo de industria que presente problemas de corrosión y/o de desgaste en sus procesos.
- Al realizar el análisis de las mediciones de espesores de la Refinería se encontró con que muchas lecturas tomadas no podían incluirse en los cálculos debido a que los espesores leídos con el aparato resultaban mucho mayores al diámetro nominal de la tubería, no es difícil pensar que esto se debió a la mala calibración del aparato o a defectos de procedimiento en la toma de la medición, por todo esto se dificultó el proceso de selección de las unidades de control.
- El control efectivo de la corrosión extiende la vida útil de cualquier tubería. El costo de un paro de proceso inesperado por un escape supera en magnitud los gastos que acarrea la instalación de un sistema de protección contra la corrosión. Controlar el deterioro de las tuberías por corrosión ahorra dinero, preserva el ambiente, protege la integridad de las instalaciones y de las vidas humanas.

5.2 RECOMENDACIONES

- Debido a la alta corrosividad y desgaste a la que se encuentran expuestos los materiales de construcción en instalaciones de proceso, se recomienda llevar un buen control de mantenimiento de piezas y equipos, así como programas que mejoren las prácticas de medición de espesores, para ello es recomendable el uso de la tecnología para evitar errores humanos en las mediciones y en los análisis posteriores.
- Continuar realizando mejoras al procedimiento actual de medición de espesores en instalaciones de PEMEX Refinación, con la finalidad de actualizar las formas y de esta manera estar en una constante actualización.



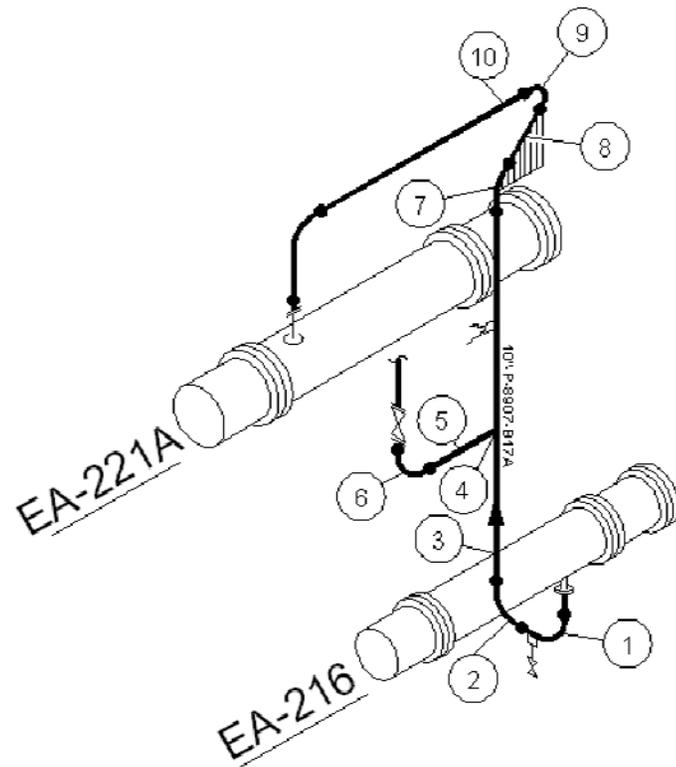
- Capacitar al personal encargado de realizar, tanto la medición en campo como el análisis estadístico posterior a la medición, en las mejoras efectuadas y de los beneficios obtenidos.
- En lo posible se deben reducir cambios de dirección en el fluido así como también minimizar el número de reducciones, ampliaciones, codos, etc. en la línea, de esta forma se logra disminuir el desgaste por erosión en la tubería. Se debe también seleccionar el material más adecuado del que va a estar constituido la tubería, o tramo de tubería en el caso de emplazamientos, el estudio debe involucrar las condiciones imperantes del medio ambiente así como las características corrosivas de la sustancia a transportar con el fin de disminuir la corrosión y por lo tanto mejorar la seguridad de los procesos.
- Al tratar a todos las lecturas de espesor que resultan de una inspección como una población general se cometen errores que pueden incidir en consecuencias, que en el mejor de los casos se presente un exceso de mediciones, con el respectivo costo horas-hombre que esto significa, pero si en el análisis estadístico no se hace una caracterización de puntos críticos, es posible que algunos pasen por alto con los riesgos inherentes que ello significaría.
- En otros documentos referentes a la medición de espesores como los códigos ASME B31.3-2002 y API 570, el análisis se realiza de forma individual para cada punto y no de una manera global como se menciona en el documento DG-GPASI-IT-00204, en este último se pretende que a partir de una muestra de lecturas de velocidad de corrosión se infiera el comportamiento de la totalidad de puntos, lo cual no es siempre recomendable.
- Con el trabajo realizado no se pretende hacer hincapié en los errores cometidos actualmente durante y después de las inspecciones de espesores, sino por el contrario, que ésta tesis sirva como una mejora al procedimiento actual, todo con el fin de asegurar el perfecto funcionamiento de las instalaciones y aumentar la seguridad de las personas que en ellas laboren.



ANEXO A

DIBUJO ISOMÉTRICO DE LA
UC-ALK-039





LINEA FORRADA

LINEA	ESPECIFICACION	DIAM.	CEDULA	ESPESOR	LIMITE RETIRO	PRESIÓN PSIG. MAX. / OP.	TEMP. °C MAX. / OP.
P-8907	A-106-GrB-B17A	10"	STD	0.365"	0.190"	300	ND
						285	77

REFINERÍA		
SECTOR / AREA:		
PLANTA: ALGULACIÓN		
Fecha:	Circuito: RECIRCULACIÓN DE ISOBUTANO	
Lev. en Campo:		
Dibujó:	U. de C.: UC-ALK-039	Isométrico No: 1 DE 1
Revisó:		

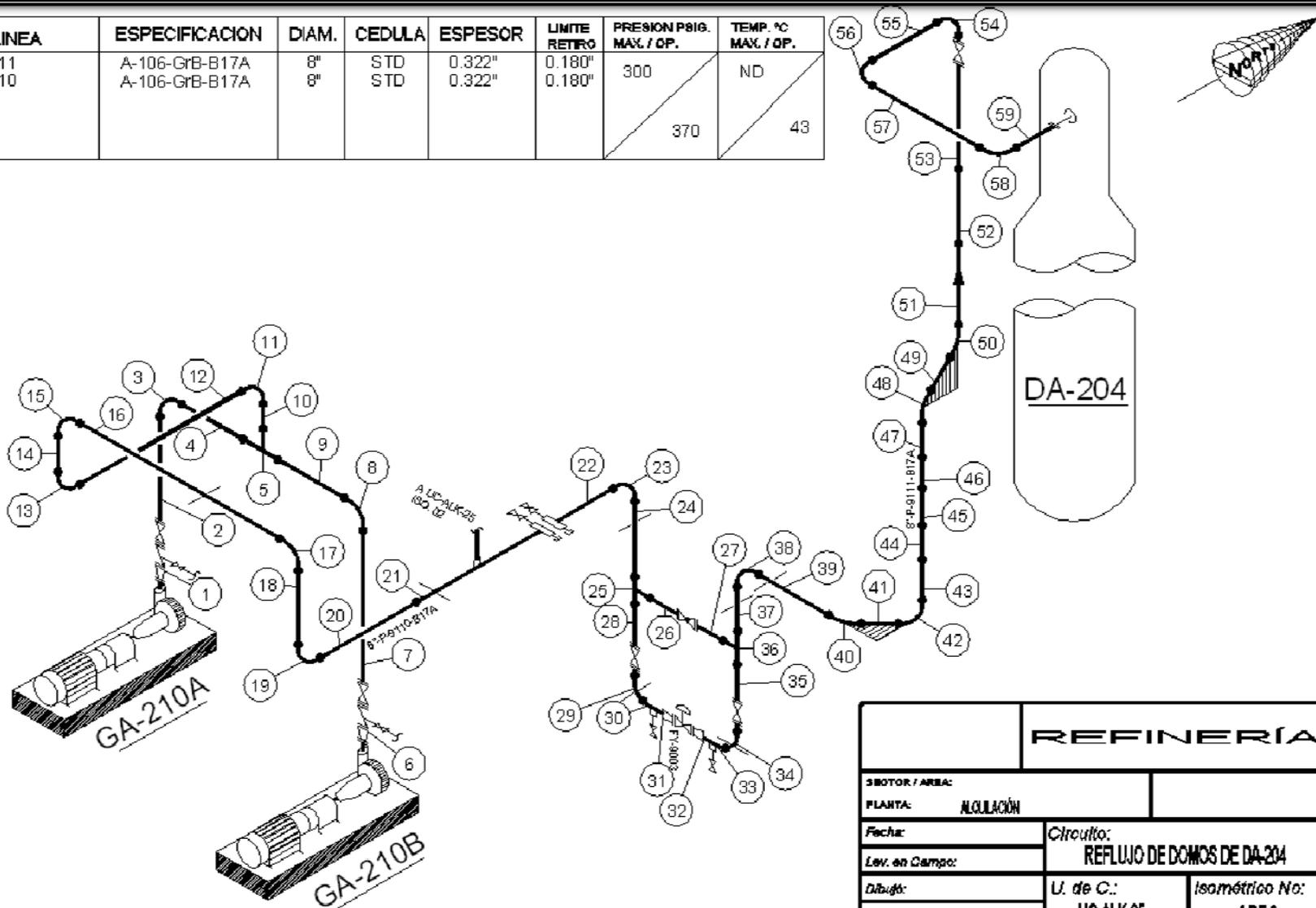


ANEXO B

DIBUJO ISOMÉTRICO DE LA
UC-ALK-025

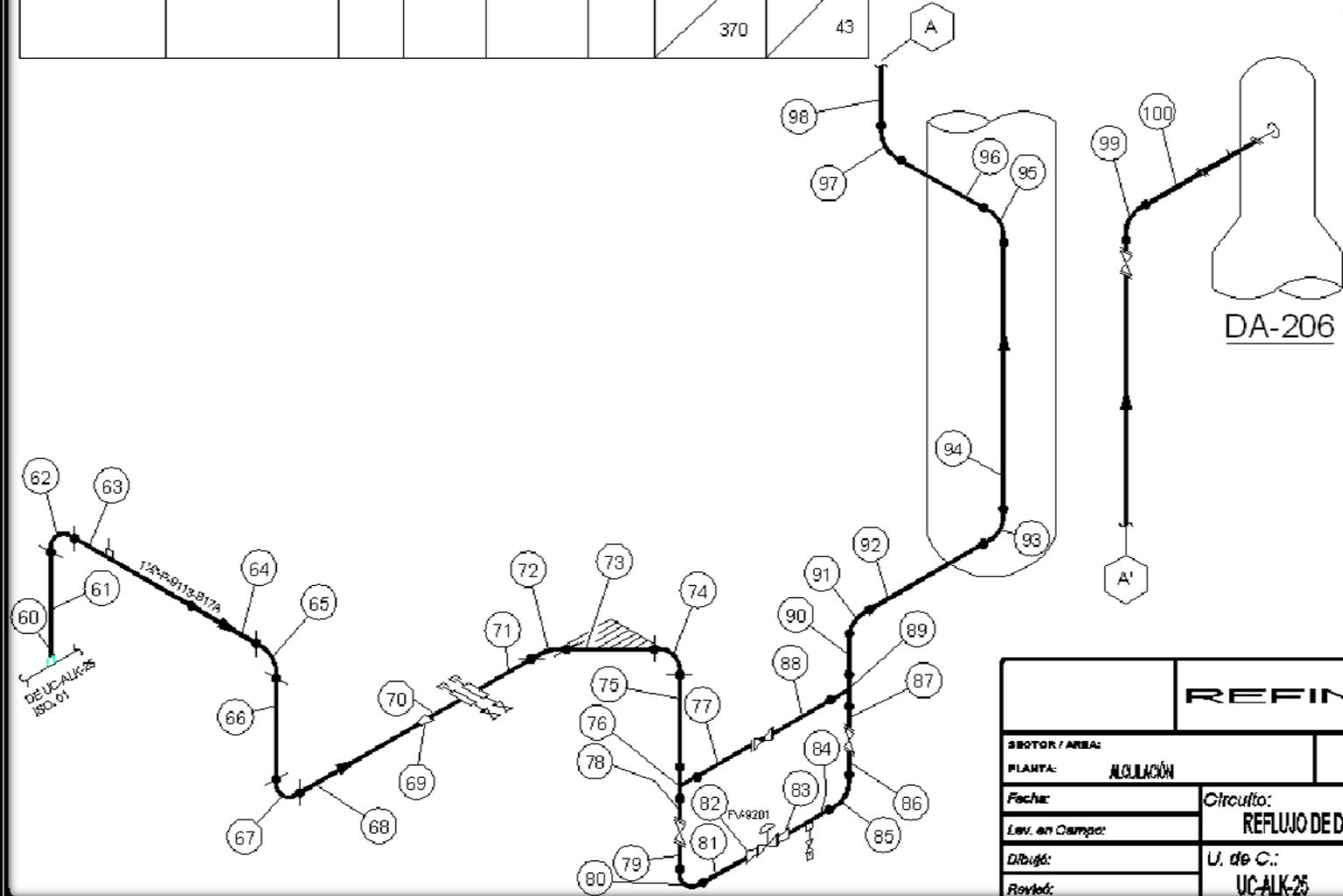


LINEA	ESPECIFICACION	DIAM.	CEDULA	ESPEJOR	LIMITE RETIRO	PRESION PSIG. MAX. / OP.	TEMP. °C MAX. / OP.
P-9111	A-106-GrB-B17A	8"	STD	0.322"	0.180"	300	ND
P-9110	A-106-GrB-B17A	8"	STD	0.322"	0.180"	370	43



REFINERÍA		
SECTOR / AREA:		
PLANTA: ALQUILACIÓN		
Fecha:	Circuito:	
Lev. en Campo:	REFLUJO DE DOMOS DE DA-204	
Dibujó:	U. de C.:	Isométrico No.:
Revisó:	UC-ALK-25	1DE2

LINEA	ESPECIFICACION	DIAM.	CEDULA	ESPEJOR	LIMITE RETIRO	PRESION PSIG. MAX. / OP.	TEMP. °C MAX. / OP.
P-9113	A-106-GrB-B17A	1½"	XS	0.200"	0.100"	300 / 370	ND / 43



REFINERÍA		
SECTOR / AREA:		
PLANTA: ALCULACIÓN		
Fecha:	Circuito:	
Lev. en Campo:	REFLUJO DE DOMOS DE DA-204	
Dibujó:	U. de C.:	isométrico No.:
Revisó:	UC-ALK-25	2DE2



ANEXO C

HISTORIAL DEL REGISTRO DE
MEDICIÓN DE ESPESORES DE LA
UC-ALK-039



REFINACIÓN				REGISTRO DE MEDICIÓN DE ESPESORES					
				SUBDIRECCIÓN		PRODUCCIÓN			
GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL				CENTRO DE TRABAJO		REFINERÍA			
				SECTOR / ÁREA		5			
PLANTA				ALQUILACIÓN					
REGISTRO				CIRCUITO		Circuito 16, Recirculación de isobutano			
				UNIDAD DE CONTROL		UC-ALK-039			
DESCRIPCIÓN				FECHA					
				Jun-00		Mar-03		May-05	
NIVEL DE MEDICIÓN	DIAM. NOM. [in] ESP. ORIG. [in x 10 ⁻³]	LIMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	LOCALIZACIÓN	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]
1	10	190	NORTE	445		370		360	4.6
			SUR	382		375	2.5	380	-
	365		CODO	398		380	2.9	370	4.6
			GARGANTA	406		390	9.5	380	4.6
2	10	190	NORTE	391		370	7.6	365	2.3
			SUR	395		400		400	0
	365		CODO	346		350	14.2	320	13.8
			GARGANTA	389		360		360	0
3	10	190	NORTE	331		320	4.0	310	4.6
			SUR	316		300	5.8	290	4.6
	365		ORIENTE	374		350	8.7	310	18.4
			PONIENTE	318		310	2.9	300	4.6
4	10	190	ORIENTE	339		320	6.9	310	4.6
			PONIENTE	321		300	7.6	290	4.6
	365		ARRIBA	334		310	8.7	300	4.6
			ABAJO	324		310	5.1	290	9.2
5	10	190	ORIENTE	362		320	15.3	310	4.6
			PONIENTE	371		340	11.3	330	4.6
	365		CODO	327		310	18.9	250	27.7
			GARGANTA	362		330		320	4.6
6	10	190	NORTE	422		400	6.0	390	4.6
			SUR	392		350	15.3	340	4.6
	365		CODO	419		400	6.9	350	23
			GARGANTA	445		400		390	4.6
7	10	190	NORTE	348		320	9.5	300	9.2
			SUR	334		310	8.7	300	4.6
	365		ARRIBA	353		320	12.0	310	4.6
			ABAJO	337		310	9.8	300	4.6
8	10	190	ARRIBA	380		340	14.8	340	0
			ABAJO	376		340	13.1	330	4.6
	365		CODO	352		320		320	0
			GARGANTA	427		310		310	0
9	10	190	ARRIBA	340		310	10.9	300	4.6
			ABAJO	353		320	12.0	310	4.6
	365		CODO	373		330	15.6	330	0
			GARGANTA	344		310	12.4	310	0
10	10	190	ORIENTE	427		310	42.6	310	0
			PONIENTE	373		340	12.0	340	0
	365		CODO	405		370	17.8	360	4.6
			GARGANTA	399		350	12.7	360	-
OBSERVACIONES:									
Purificadores									
ANALIZÓ				FECHA DEL REPORTE					
Formato: DG-GPASI-IT-00204-2									



ANEXO D

HISTORIAL DEL REGISTRO DE
MEDICIÓN DE ESPESORES DE LA
UC-ALK-025



REFINACIÓN				REGISTRO DE MEDICION DE ESPEORES					
				SUBDIRECCION		PRODUCCION			
GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL				CENTRO DE TRABAJO		REFINERIA			
				SECTOR / AREA		5			
				PLANTA		ALQUILACION			
REGISTRO				CIRCUITO		Circuito 08, Reflujo de domos de la DA-204			
				UNIDAD DE CONTROL		UC-ALK-025			
DESCRIPCIÓN				FECHA					
				Jun-00		May-02		Ene-05	
NIVEL DE MEDICIÓN	DIAM. NOM. ESP.	LIMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	LOCALIZACIÓN	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]
1	8"	180	NORTE	305		308		385	
			SUR	305		267		390	
	322		ORIENTE	400		273		390	
	PONIENTE		408		306		390		
2	8"	180	NORTE	308		302	3.1	295	2.6
			SUR	307		304	1.6	305	
	322		ORIENTE	294		298		290	3.0
	PONIENTE		300		307		290	6.4	
3	8"	180	NORTE	322		339		345	
			SUR	320		316	2.1	315	0.4
	322		CODO	309		307	1.0	295	4.5
	GARGANTA		338		327	5.7	310	6.4	
4	8"	180	NORTE	301		309		295	5.2
			SUR	316		312	2.1	295	6.4
	322		ARRIBA	301		293	4.2	285	3.0
	ABAJO		317		316	0.5	300	6.0	
5	8"	180	NORTE	402		359		350	3.4
			SUR	358		340	9.4	345	
	322		OBSTRUCCIÓN						
	ABAJO		407		407		395		
6	8"	180	NORTE	570		549		580	
			SUR	572		506		570	
	322		ORIENTE	573		498		550	
	PONIENTE		572		573		580		
7	8"	180	NORTE	313		311	1.0	300	4.1
			SUR	311		313		300	4.9
	322		ORIENTE	312		311	0.5	300	4.1
	PONIENTE		305		298	3.7	290	3.0	
8	8"	180	NORTE	339		315	12.5	310	1.9
			SUR	339		333	3.1	320	4.9
	322		CODO	314		313	0.5	300	4.9
	GARGANTA		342		328	7.3	315	4.9	
9	8"	180	NORTE	305		307		290	6.4
			SUR	318		311	3.7	300	4.1
	322		ARRIBA	312		292	10.4	280	4.5
	ABAJO		317		305	6.3	295	3.7	
10	8"	180	NORTE	303		302	0.5	290	4.5
			SUR	314		299	7.8	290	3.4
	322		ORIENTE	307		306	0.5	295	4.1
	PONIENTE		316		299	8.9	295	1.5	

OBSERVACIONES:

Puntos críticos

ANALIZÓ

FECHA DEL REPORTE

Formato: DG-GPASHI-00204-2

REFINACIÓN				REGISTRO DE MEDICIÓN DE ESPEORES					
				SUBDIRECCIÓN		PRODUCCIÓN			
GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL				CENTRO DE TRABAJO		REFINERÍA			
				SECTOR / ÁREA		5			
				PLANTA		ALQUILACIÓN			
REGISTRO				CIRCUITO		Circuito 08, Reflujo de domos de la DA-204			
				UNIDAD DE CONTROL		UC-ALK-025			
DESCRIPCIÓN				FECHA					
				Jun-00		May-02		Ene-05	
NIVEL DE MEDICIÓN	DIAM. NOM. ESP.	LIMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	LOCALIZACIÓN	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]
11	8"	180	ORIENTE	356		352	2.1	340	4.5
			PONIENTE	355		340	7.8	330	3.7
	322		CODO	318		314	2.1	305	3.4
	GARGANTA		354		337	8.9	320	6.4	
12	8"	180	ORIENTE	318		314	2.1	305	3.4
			PONIENTE	318		304	7.3	295	3.4
	322		ARRIBA	314		306	4.2	295	4.1
	ABAJO		315		308	3.7	290	6.7	
13	8"	180	ORIENTE	375		343	16.7	330	4.9
			PONIENTE	378		358	10.4	330	10.5
	322		CODO	386		274	58.5	280	
	GARGANTA		384		365	9.9	370		
14	8"	180	NORTE	324		319	2.6	310	3.4
			SUR	338		312	13.6	320	
	322		ORIENTE	323		321	1.0	310	4.1
	PONIENTE		317		311	3.1	280	11.6	
15	8"	180	NORTE	369		360	4.7	365	
			SUR	385		329	29.2	355	
	322		CODO	367		367	0.0	350	6.4
	GARGANTA		370		330	20.9	370		
16	8"	180	NORTE	348		328	10.4	320	3.0
			SUR	344		322	11.5	330	
	322		ARRIBA	343		316	13.1	305	4.9
	ABAJO		343		307	18.8	310		
17	8"	180	NORTE	348		336	6.3	330	2.2
			SUR	399		325		330	
	322		CODO	350		324	13.6	320	1.5
	GARGANTA		340		333	3.7	350		
18	8"	180	NORTE	325		313	6.3	310	1.1
			SUR	328		310	9.4	310	0.0
	322		ORIENTE	326		324	1.0	320	1.5
	PONIENTE		323		308	7.8	305	1.1	
19	8"	180	ORIENTE	349		329	10.4	315	5.2
			PONIENTE	350		358		370	
	322		CODO	344		378		335	16.1
	GARGANTA		352		327	13.1	320	2.6	
20	8"	180	ORIENTE	324		321	1.6	320	0.4
			PONIENTE	324		308	8.4	305	1.1
	322		ARRIBA	324		303	11.0	290	4.9
	ABAJO		324		297	14.1	310		
OBSERVACIONES:									
Puntos orificio									
ANALIZÓ									
FECHA DEL REPORTE									
Formato: DG-GPASHIT-00204-2									

REFINACIÓN				REGISTRO DE MEDICION DE ESPESORES					
				SUBDIRECCION		PRODUCCION			
GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL				CENTRO DE TRABAJO		REFINERÍA			
				SECTOR / ÁREA		5			
				PLANTA		ALQUILACIÓN			
REGISTRO				CIRCUITO		Circuito 08, Reflujo de domos de la DA-204			
				UNIDAD DE CONTROL		UC-ALK-025			
DESCRIPCIÓN				FECHA					
				Jun-00		May-02		Ene-05	
NIVEL DE MEDICIÓN	DIAM. NOM. ESP.	LIMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	LOCALIZACIÓN	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]
21	8"	180	ORIENTE	330		312	9.4	295	6.4
			PONIENTE	329		325	2.1	310	5.6
	322		ARRIBA	331		306	13.1	295	4.1
			ABAJO	326		316	5.2	300	6.0
22	8"	180	ORIENTE	324		322	1.0	320	0.7
			PONIENTE	323		290	17.2	285	1.9
	322		ARRIBA	322		308	7.3	305	1.1
			ABAJO	324		316	4.2	310	2.2
23	8"	180	ORIENTE	345		358		335	8.6
			PONIENTE	344		330	7.3	330	0.0
	322		CODO	327		313	7.3	300	4.9
			GARGANTA	347		363		340	8.6
24	8"	180	NORTE	320		308	6.3	290	6.7
			SUR	314		298	8.4	295	1.1
	322		ORIENTE	315		297	9.4	295	0.7
			PONIENTE	313		308	2.6	295	4.9
25	8"	180	NORTE	327		311	8.4	300	4.1
			SUR	324		313	5.7	295	6.7
	322		OBSTRUCCIÓN						
			PONIENTE	324		310	7.3	295	5.6
26	8"	180	NORTE	280		250	11.0	255	1.5
			SUR	283		265	9.4	260	1.9
	322		ARRIBA	282		250	12.0	245	5.2
			ABAJO	284		272	6.3	260	4.5
27	8"	180	NORTE	269		269	0.0	270	
			SUR	268		258	5.2	250	3.0
	322		ARRIBA	266		271		270	0.4
			ABAJO	267		255	6.3	255	0.0
28	8"	180	NORTE						
			SUR						
	322		ORIENTE						
			PONIENTE						
29	8"	180	NORTE	349		350		335	5.6
			SUR	357		345	6.3	340	1.9
	322		CODO	344		283	31.9	290	
			GARGANTA	369		361	4.2	360	0.4
30	8"	180	NORTE	329		313	8.4	310	1.1
			SUR	329		296	17.2	295	0.4
	322		ARRIBA	338		311	14.1	310	0.4
			ABAJO	329		308	11.0	310	

OBSERVACIONES:

Puntos orificios

ANALIZÓ

FECHA DEL REPORTE

Formato: DG-GPASH-T-00204-2

REFINACIÓN				REGISTRO DE MEDICION DE ESPESORES					
				SUBDIRECCION		PRODUCCION			
GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL				CENTRO DE TRABAJO		REFINERIA			
				SECTOR / ÁREA		5			
				PLANTA		ALQUILACIÓN			
REGISTRO				CIRCUITO		Circuito 08, Reflujo de domos de la DA-204			
				UNIDAD DE CONTROL		UC-ALK-025			
DESCRIPCIÓN				FECHA					
				Jun-00		May-02		Ene-05	
NIVEL DE MEDICIÓN	DIAM. NOM. ESP.	LIMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	LOCALIZACIÓN	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]
31	8"	180	NORTE	357		294	32.9	320	
			SUR	358		308	26.1	325	
	ARRIBA		361		313	25.1	335		
	ABAJO		367		309	30.3	330		
32	8"	180	NORTE	347		297	26.1	320	
			SUR	356		302	28.2	325	
	ARRIBA		348		294	28.2	325		
	ABAJO		344		305	20.4	340		
33	8"	180	NORTE	312		311	0.5	310	0.4
			SUR	314		292	11.5	290	0.7
	ARRIBA		326		302	12.5	300	0.7	
	ABAJO		311		311	0.0	310	0.4	
34	8"	180	NORTE	369		361		310	26.6
			SUR	363		351	6.3	345	2.2
	CODO		381		346	18.3	330	6.0	
	GARGANTA		362		342	10.4	345		
35	8"	180	NORTE	308		301	3.7	305	
			SUR	310		306	1.0	305	1.1
	ORIENTE		308		305	1.6	310		
	PONIENTE		309		313		305	3.0	
36	8"	180	NORTE	340		303	19.3	305	
			SUR	339		305	17.8	305	0.0
	ORIENTE		334		299	18.3	305		
	OBSTRUCCIÓN								
37	8"	180	NORTE						
			SUR						
	ORIENTE								
	PONIENTE								
38	8"	180	NORTE	334		344		350	
			SUR	336		321	7.8	325	
	CODO		333		309	12.5	300	3.4	
	GARGANTA		404		376		380		
39	8"	180	NORTE	344		313	16.2	315	
			SUR	368		314	28.2	320	
	ARRIBA		346		321	14.1	325		
	ABAJO		346		295	27.7	320		
40	8"	180	ARRIBA	362		362	10.4		
			ABAJO	349		351			
	CODO		343		336	2.6			
	GARGANTA		377		316	30.8			

OBSERVACIONES:

Puntos críticos

ANALIZÓ

FECHA DEL REPORTE

Formato: DG-GPASHI-00204-2

REFINACIÓN				REGISTRO DE MEDICION DE ESPESORES					
				SUBDIRECCION		PRODUCCION			
GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL				CENTRO DE TRABAJO		REFINERÍA			
				SECTOR / ÁREA		5			
				PLANTA		ALQUILACIÓN			
REGISTRO				CIRCUITO		Circuito 08, Reflujo de domos de la DA-204			
				UNIDAD DE CONTROL		UC-ALK-025			
DESCRIPCIÓN				FECHA					
				Jun-00		May-02		Ene-05	
NIVEL DE MEDICIÓN	DIAM. NOM. ESP.	LIMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	LOCALIZACIÓN	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]
41	8"	180	NORTE	341		330	5.7		
			SUR	341		317	12.5		
	322		ARRIBA	340		328	6.3		
			ABAJO	338		331	3.7		
42	8"	180	NORTE	375		371	2.1		
			SUR	378		377	0.5		
	322		CODO	335		310	13.1		
			GARGANTA	416		379			
43	8"	180	NORTE	351		339	6.3		
			SUR	330		321	4.7		
	322		ORIENTE	328		316	6.3		
			PONIENTE	329		302	14.1		
44	8"	180	NORTE	328		308	10.4	305	0.4
			SUR	327		315	6.3	295	7.5
	322		ORIENTE	331		319	6.3	295	9.0
			PONIENTE	335		319	8.4	305	5.2
45	8"	180	NORTE	321		335		300	13.1
			SUR	321		313	4.2	285	10.5
	322		ORIENTE	317		321		300	7.9
			PONIENTE	317		328		300	10.5
46	8"	180	NORTE	328		302	13.6	285	6.4
			SUR	327		316	5.7	305	4.1
	322		ORIENTE	329		300	15.1	295	1.9
			PONIENTE	329		302	14.1	305	
47	8"	180	NORTE	317		317	0.0	300	6.4
			SUR	321		312	4.7	305	2.6
	322		ORIENTE	319		305	7.3	285	7.5
			PONIENTE	318		302	8.4	305	
48	8"	180	ORIENTE	320		305	7.8		
			PONIENTE	317		306	5.7		
	322		CODO	278		260			
			GARGANTA	329		305	12.5		
49	8"	180	NORTE	330		315	7.8		
			SUR	334		319	7.8		
	322		ARRIBA	322		313	4.7		
			ABAJO	334		312	11.5		
50	8"	180	ORIENTE	313		308	2.6		
			PONIENTE	317		315	1.0		
	322		CODO	298		300			
			GARGANTA	300		302			

OBSERVACIONES:

Puntos orificios

ANALIZÓ

FECHA DEL REPORTE

Formato: DG-GPASHI-T-00204-2

REFINACIÓN				REGISTRO DE MEDICION DE ESPESORES					
				SUBDIRECCION		PRODUCCION			
GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL				CENTRO DE TRABAJO		REFINERÍA			
				SECTOR / ÁREA		5			
				PLANTA		ALQUILACIÓN			
REGISTRO				CIRCUITO		Circuito 08, Reflujo de domos de la DA-204			
				UNIDAD DE CONTROL		UC-ALK-025			
DESCRIPCIÓN				FECHA					
				Jun-00		May-02		Ene-05	
NIVEL DE MEDICIÓN	DIAM. NOM. ESP.	LIMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	LOCALIZACIÓN	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]
51	8"	180	NORTE	305		300	2.6		
			SUR	327		315	6.3		
	322		ORIENTE	315		302	6.8		
			PONIENTE	323		312	5.7		
52	8"	180	NORTE	328		342			
			SUR	323		323	0.0		
	322		ORIENTE	345		309	18.8		
			PONIENTE	328		306	11.5		
53	8"	180	NORTE						
			SUR						
	322		ORIENTE						
			PONIENTE						
54	8"	180	ORIENTE	354		335	9.9	325	3.7
			PONIENTE	351		348	1.6	330	6.7
	322		CODO	303		296	2.6	295	1.1
			GARGANTA	429		375		355	7.5
55	8"	180	ORIENTE	323		307	8.4	290	6.4
			PONIENTE	323		316	3.7	300	6.0
	322		ARRIBA	324		303	11.0	290	4.9
			ABAJO	323		314	4.7	310	1.5
56	8"	180	ARRIBA	372		345	14.1	335	3.7
			ABAJO	372		340	16.7	350	
	322		CODO	314		314	0.0	310	1.5
			GARGANTA	420		370		360	3.7
57	8"	180	NORTE	316		306	5.2	290	6.0
			SUR	316		296	9.4	305	
	322		ARRIBA	319		303	8.4	285	6.7
			ABAJO	318		305	6.8	295	3.7
58	8"	180	ARRIBA	398		361		350	4.1
			ABAJO	396		376		355	6.6
	322		CODO	363		310	27.7	305	1.9
			GARGANTA	394		370		350	7.5
59	8"	180	ORIENTE	344		322	11.5	310	4.5
			PONIENTE	340		324	8.4	310	5.2
	322		ARRIBA	336		324	7.3	310	5.2
			ABAJO	335		322	6.8	290	12.0
60	1½"	100	NORTE	411		421		430	
			SUR	412		426		425	
	200		ORIENTE	404		432		425	
			PONIENTE	409		434		430	

OBSERVACIONES:

Puntos orificios

ANALIZÓ

FECHA DEL REPORTE

Formato: DG-GPASH-T-00204-2

REFINACIÓN				REGISTRO DE MEDICION DE ESPESORES					
				SUBDIRECCION		PRODUCCION			
GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL				CENTRO DE TRABAJO		REFINERIA			
				SECTOR / ÁREA		5			
				PLANTA		ALQUILACIÓN			
REGISTRO				CIRCUITO		Circuito 08, Reflujo de domos de la DA-204			
				UNIDAD DE CONTROL		UC-ALK-025			
DESCRIPCIÓN				FECHA					
				Jun-00		May-02		Ene-05	
NIVEL DE MEDICIÓN	DIAM. NOM. ESP.	LIMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	LOCALIZACIÓN	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]
61	1½"	100	NORTE	224		211	6.8	205	2.2
			SUR	210		196	7.3	190	2.2
	ORIENTE		209		206	0.5	200	3.0	
	PONIENTE		205		199	3.1	195	1.5	
62	1½"	100	NORTE	194		176	9.4	180	
			SUR	186		176	5.2	180	
	CODO		145		160		165		
	GARGANTA		236		164	27.2	200		
63	1½"	100	NORTE	194		200		200	0.0
			SUR	190		189		195	1.5
	ARRIBA		193		201		195	2.2	
	ABAJO		190		196		190	3.0	
64	1½"	100	NORTE	185		177	4.2	175	0.7
			SUR	188		175	6.8	175	0.0
	ARRIBA		177		172	2.6	170	0.7	
	ABAJO		186		175	5.7	180		
65	1½"	100	NORTE	165		160	2.6	150	3.7
			SUR	166		161	2.6	150	4.1
	CODO		168		162	3.1	125	13.8	
	GARGANTA		172		168	2.1	160	3.0	
66	1½"	100	NORTE	182		175	3.7	165	3.7
			SUR	186		174	6.3	165	3.4
	ORIENTE		188		178	5.2	170	3.0	
	PONIENTE		183		172	5.7	160	4.5	
67	1½"	100	ORIENTE	174		165	4.7	160	1.9
			PONIENTE	177		172	2.6	160	4.5
	CODO		174		162	6.3	135	10.1	
	GARGANTA		183		172	5.7	150	8.2	
68	1½"	100	ORIENTE	186		175	5.7	170	1.9
			PONIENTE	182		170	6.3	170	0.0
	ARRIBA		183		169	7.3	170		
	ABAJO		197		180	3.7	170	7.5	
69	2"	100	ORIENTE	239		217	11.5	220	
			PONIENTE	234		203	16.2	220	
	ARRIBA		231		201	15.7	210		
	ABAJO		236		202	17.6	195	2.6	
70	2"	100	ORIENTE	206		184	6.3	180	5.2
			PONIENTE	200		204		190	5.2
	ARRIBA		190		201		195	2.2	
	ABAJO		202		194	4.2	180	5.2	

OBSERVACIONES:

Puntos críticos

ANALIZÓ

FECHA DEL REPORTE

Formato: DG-GPASHI-00204-2

REFINACIÓN				REGISTRO DE MEDICIÓN DE ESPEORES					
				SUBDIRECCIÓN		PRODUCCIÓN			
GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL				CENTRO DE TRABAJO		REFINERÍA			
				SECTOR / ÁREA		5			
				PLANTA		ALQUILACIÓN			
REGISTRO				CIRCUITO		Circuito 08, Reflujo de domos de la DA-204			
				UNIDAD DE CONTROL		UC-ALK-025			
DESCRIPCIÓN				FECHA					
				Jun-00		May-02		Ene-05	
NIVEL DE MEDICIÓN	DIAM. NOM. ESP.	LIMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	LOCALIZACIÓN	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]
71	2"	100	ORIENTE	216		186	10.4	180	8.0
			PONIENTE	216		194	12.5	170	9.0
	ARRIBA		219		200	9.9	160	15.0	
	ABAJO		217		183	12.5	170	8.6	
72	2"	100	ARRIBA	226		217	4.7	215	0.7
			ABAJO	216		225		220	1.9
	CODO		196		191	2.6	170	7.9	
	GARGANTA		253		220	17.2	230		
73	2"	100	NORTE	186		193		190	1.1
			SUR	190		194		190	1.5
	ARRIBA		181		183		190	1.1	
	ABAJO		201		201	0.0	190	4.1	
74	2"	100	NORTE	213		188	13.1	215	
			SUR	190		217		185	12.0
	CODO		171		169	1.0	160	3.4	
	GARGANTA		217		202	7.8	230		
75	2"	100	NORTE	207		186	11.0	185	0.4
			SUR	208		200	4.2	180	7.5
	ORIENTE		206		197	5.7	185	4.5	
	PONIENTE		207		196	4.7	190	3.0	
76	2"	100	OBSTRUCCIÓN						
			SUR	313		361		355	
	ORIENTE		346		301	24.5	320		
77	2"	100	PONIENTE	272		320		310	
			ORIENTE	181		181		185	2.2
	ARRIBA		187		185	1.0	190		
	ABAJO		183		187		180	2.6	
78	2"	100	ABAJO	191		182		190	0.7
			NORTE	177		166		190	
	SUR		164		164		180	1.5	
	ORIENTE		178		170	4.2	180		
79	2"	100	PONIENTE	173		182		165	6.4
			NORTE	194		183	5.7	180	1.1
	SUR		200		162	9.4	185		
	ORIENTE		199		176	12.0	175	0.4	
80	2"	100	PONIENTE	207		171	18.6	175	
			ORIENTE	225		225	0.0	215	3.7
	PONIENTE		222		219	1.6	200	7.1	
	CODO		196		184	6.3	170	5.2	
	218		GARGANTA	312		237		260	
OBSERVACIONES:									
Puntos críticos									
ANALIZÓ									
FECHA DEL REPORTE									
Formato: DG-GPASH-T-00204-2									

REFINACIÓN				REGISTRO DE MEDICION DE ESPESORES					
				SUBDIRECCION		PRODUCCION			
GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL				CENTRO DE TRABAJO		REFINERIA			
				SECTOR / ÁREA		5			
				PLANTA		ALQUILACIÓN			
REGISTRO				CIRCUITO		Circuito 08, Reflujo de domos de la DA-204			
				UNIDAD DE CONTROL		UC-ALK-025			
DESCRIPCIÓN				FECHA					
				Jun-00		May-02		Ene-05	
NIVEL DE MEDICIÓN	DIAM. NOM. ESP.	LIMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	LOCALIZACIÓN	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]
81	2"	100	ORIENTE	185		190		185	1.9
			PONIENTE	189		186	1.6	175	4.1
	ARRIBA		181		189		180	10.8	
	ABAJO		183		184		185		
82	2"	100	ORIENTE	216		229		225	1.5
			PONIENTE	206		219		210	3.4
	ARRIBA		210		216		205	4.9	
	ABAJO		206		226		225	1.1	
83	2"	100	ORIENTE	220		200	10.4	210	
			PONIENTE	219		197	11.5	210	
	ARRIBA		216		209	4.7	200	3.4	
	ABAJO		219		216	1.6	210	2.2	
84	2"	100	ORIENTE	178		190		185	1.9
			PONIENTE	177		197		190	2.8
	ARRIBA		180		184		175	3.4	
	ABAJO		177		182		180	0.7	
85	2"	100	ORIENTE	211		206	1.6	215	
			PONIENTE	206		206	1.0	200	2.2
	CODO		163		160	1.6	150	3.7	
	GARGANTA		309		256	27.7	260		
86	2"	100	NORTE	196		196	0.0	190	2.2
			SUR	195		196		185	0.4
	ORIENTE		195		186	3.7	190		
	PONIENTE		196		192	2.1	185	2.8	
87	2"	100	NORTE	189		182		190	0.7
			SUR	188		196		190	2.2
	ORIENTE		190		187	1.6	190		
	PONIENTE		188		191		185	2.2	
88	2"	100	ORIENTE						
			PONIENTE						
	ARRIBA								
	ABAJO								
89	2"	100	NORTE	328		354		345	
			OBSTRUCCIÓN						
	ARRIBA		359		300		285		
218	100	PONIENTE	321		295		300		
		ORIENTE	208		210		200	3.7	
218	100	SUR	209		207	1.0	200	2.8	
		ORIENTE	204		203	0.5	200	1.1	
218	100	PONIENTE	205		201	2.1	195	2.2	

OBSERVACIONES:

Puntos críticos

ANALIZÓ

FECHA DEL REPORTE

Formato: DG-GPASI-IT-00204-2

REFINACIÓN				REGISTRO DE MEDICIÓN DE ESPEORES					
				SUBDIRECCIÓN		PRODUCCIÓN			
GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL				CENTRO DE TRABAJO		REFINERÍA			
				SECTOR / ÁREA		5			
				PLANTA		ALQUILACIÓN			
REGISTRO				CIRCUITO		Circuito 08, Reflujo de domos de la DA-204			
				UNIDAD DE CONTROL		UC-ALK-025			
DESCRIPCIÓN				FECHA					
				Jun-00		May-02		Ene-05	
NIVEL DE MEDICIÓN	DIAM. NOM. ESP.	LIMITE DE RETIRO [in x 10 ⁻³]	LOCALIZACIÓN	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]	ESPESOR [in x 10 ⁻³]	VELOCIDAD DE DESGASTE [in x 10 ⁻³ / año]
91	2"	100	ORIENTE	198		202		190	4.5
			PONIENTE	193		212		205	2.6
	218		CODO	176		199		180	7.1
	GARGANTA		323		226		240		
92	2"	100	ORIENTE	189		206		195	4.1
			PONIENTE	195		203		200	1.1
	218		ARRIBA	186		203		190	4.9
	ABAJO		204		207		205	0.7	
93	2"	100	ORIENTE	223		225		225	0.0
			PONIENTE	209		206	1.6	200	2.2
	218		CODO	183		202		190	4.5
	GARGANTA		248		206	21.9	220		
94	2"	100	NORTE	210		211		205	2.2
			SUR	211		209	1.0	200	3.4
	218		ORIENTE	206		208		195	4.9
	PONIENTE		205		208		200	3.0	
95	2"	100	NORTE	211		219		220	
			SUR	216		227		215	4.5
	218		CODO	197		166	4.7	165	6.6
	GARGANTA		268		233		245		
96	2"	100	NORTE	182		206		195	4.9
			SUR	203		199	2.1	195	1.5
	218		ARRIBA	181		201		180	7.9
	ABAJO		194		209		190	7.1	
97	2"	100	NORTE	230		237		230	2.6
			SUR	233		231	1.0	230	0.4
	218		CODO	203		226		180	17.2
	GARGANTA		275		230		240		
98	2"	100	NORTE	199		200		180	7.5
			SUR	197		200		190	3.7
	218		ORIENTE	196		213		190	8.6
	PONIENTE		217		205	6.3	185	7.5	
99	2"	100	ORIENTE	197		191	3.1	195	
			PONIENTE	197		209		195	5.2
	218		CODO	192		176	7.3	160	6.7
	GARGANTA		226		205	11.0	230		
100	2"	100	NORTE	201		195	3.1	180	5.6
			SUR	192		189	1.6	175	5.2
	218		ARRIBA	200		174	13.6	165	3.4
	ABAJO		176		192		170	6.2	

OBSERVACIONES:

Puntos orificios

ANALIZÓ

FECHA DEL REPORTE

Formato: DG-GPASH-T-00204-2



ANEXO E

MEMORIA DE CÁLCULO DEL
ANÁLISIS ESTADÍSTICO REALIZADO
A LA UC-ALK-025



REFINACIÓN		MEMORIA DE CÁLCULO DEL ANÁLISIS DE MEDICIÓN DE ESPESORES					
		Sector / Área	Área 5	Planta	Aquilación		
GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL		Centro de Trabajo	Refinería				
		Unidad de Control	UC-ALK-025				
Puntos normales		Fecha de Medición Actual (FMA)	Ene-05				
		Fecha Contra la que se Analiza (FCA)	May-02				
Diámetro		1 1/2"					
Suma de las velocidades de desgaste (Σd)			58.3				
Número de las velocidades de desgaste consideradas (n)			23				
Velocidad de desgaste promedio (D)			2.5				
Velocidad de Desgaste Ajustada Estadísticamente (Dmax)			3.2				
Diámetro		2"					
Suma de las velocidades de desgaste (Σd)			313.8				
Número de las velocidades de desgaste consideradas (n)			86				
Velocidad de desgaste promedio (D)			3.6				
Velocidad de Desgaste Ajustada Estadísticamente (Dmax)			4.2				
Diámetro		8"					
Suma de las velocidades de desgaste (Σd)			533.7				
Número de las velocidades de desgaste consideradas (n)			131				
Velocidad de desgaste promedio (D)			4.1				
Velocidad de Desgaste Ajustada Estadísticamente (Dmax)			4.5				
Resumen de los cálculos para cada grupo de diámetros que componen las secciones de la Unidad de Control							
Número de grupo según diámetros	Diámetro Nominal [n]	Límite de Retiro (Lr) [in x 10 ⁻³]	Espesor Mínimo Encontrado (ek) [in x 10 ⁻³]	Nivel en el que se encuentra el Espesor Mínimo	Posición en la que se encuentra el Espesor Mínimo	Vida Útil Estimada (VUE) [años]	Fecha de Próxima Medición de Espesores (FPME) [mes/año]
1	1.5	100	150	85	Norte y sur	15	Feb-10
2	2	100	150	85	Code	12	Ene-09
3	8	180	245	28	Arriba	14	Oct-09
4							
VIDA ÚTIL ESTIMADA MÍNIMA (Años)						12	
Fecha de Próxima Medición de Espesores (FPME)						Ene-09	
Fecha de Retiro Probable (FRP)						Ene-17	
Con base en la lectura del nivel número						85	
Análisis				Generación del Reporte			
						Formato: DG-GRAS-IT-024-0	

REFINACIÓN		MEMORIA DE CÁLCULO DEL ANÁLISIS DE MEDICIÓN DE ESPESORES					
		GERENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SEGURIDAD INDUSTRIAL	Sector / Área	Área 5			
			Planta	Alquilación			
			Centro de Trabajo	Refinería			
	Unidad de Control	UC-ALK-025					
Puntos críticos		Fecha de Medición Actual (FMA)	Ene-05				
		Fecha Contra la que se Analiza (FCA)	May-02				
Diámetro	1 1/2"						
Suma de las velocidades de desgaste (Σdi)		32.2					
Número de las velocidades de desgaste consideradas (n)		3					
Velocidad de desgaste promedio (D)		10.7					
Velocidad de Desgaste Ajustada Estadísticamente (Dmax)		13.8					
Diámetro	2"						
Suma de las velocidades de desgaste (Σdi)		55					
Número de las velocidades de desgaste consideradas (n)		4					
Velocidad de desgaste promedio (D)		13.7					
Velocidad de Desgaste Ajustada Estadísticamente (Dmax)		16.1					
Diámetro	8"						
Suma de las velocidades de desgaste (Σdi)		55.7					
Número de las velocidades de desgaste consideradas (n)		3					
Velocidad de desgaste promedio (D)		18.6					
Velocidad de Desgaste Ajustada Estadísticamente (Dmax)		26.3					
Resumen de los cálculos para cada grupo de diámetros que componen las secciones de la Unidad de Control							
Número de grupo según diámetros	Diámetro Nominal [n]	Límite de Retiro (Lr) [n x 10 ⁻³]	Espesor Mínimo Encontrado (ek) [n x 10 ⁻³]	Nivel en el que se encuentra el Espesor Mínimo	Posición en la que se encuentra el Espesor Mínimo	Vida Útil Estimada (VUE) [años]	Fecha de Próxima Medición de Espesores (FPME) [mes/año]
1	1.5	100	125	65	Codo	1.8	Ago-05
2	2	100	160	71 y 81	Arriba	3.7	Mar-06
3	8	180	300	45	Norte	4.8	Jul-06
4							
VIDA ÚTIL ESTIMADA MÍNIMA (Años)						1.8	
Fecha de Próxima Medición de Espesores (FPME)						Ago-05	
Fecha de Retiro Probable (FRP)						Oct-06	
Con base en la lectura del nivel número						65	
Analizó				Generación del Reporte			
Formato: DG-CPAS-IT-0204-0							



BIBLIOGRAFÍA





BIBLIOGRAFÍA

1. Edgar Darío Ruiz Valencia. Importancia de evaluar y dar seguimiento al fenómeno de la corrosión en tuberías y equipos en la industria del petróleo. UNAM 2006.
2. Gerald Keller, Brian Warrack. Statistics for Management and Economics. Editorial Thomson. Australia-México, 2004.
3. Herbert H. Uhlig, R. Winston Revie. Corrosion and Corrosion Control, Editorial John Wiley & Sons, New York, 1996.
4. Miguel Ángel Sánchez León, Jaime Celerino García Pérez. Registro, Análisis y Programación de la medición preventiva de espesores en tuberías mediante la prueba de ultrasonido en la Refinería Miguel Hidalgo de PEMEX. UNAM 2006.
5. Oscar Castorela Sánchez. Caracterización de productos de corrosión presentes en el interior de ductos. UNAM 2006.
6. Sara Iliana Landon Molina. Aplicación de la metodología Hazop del proyecto independización del desfogue ácido de la Planta de Alquilación de la Refinería Ing. Antonio M. Amor en Salamanca Gto. UNAM 2001.
7. Vanesa Trejo Juárez. Propuesta para implementar un sistema de medición de espesores en líneas y equipos de la sección de fraccionamiento de una Planta F.C.C., UNAM 2006.
8. William F. Smith, Javad Hashemi. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Editorial Mc Graw Hill, México, 2006.
9. William D. Callister. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales Tomo II, Editorial Reverté, Barcelona-México, 1995.



10. William Mendenhall. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, Editorial Pearson Educación, México, 1997.

Normas

11. NORMA DG-GPASI-IT-0204, procedimientos para el registro, análisis y programación de la medición preventiva de espesores, gerencia de protección ambiental y seguridad industrial.
12. NORMA GPASI-IT-0209, Procedimiento para efectuar la inspección de las tuberías de plantas de proceso y servicios auxiliares en operación de instalaciones de PEMEX refinación, gerencia de protección ambiental y seguridad industrial.
13. NORMA DG-ASIPA-IT-00008, Espesores de retiro para tuberías, válvulas y conexiones metálicas, empleadas en el transporte de fluidos. Dirección general de administración de la seguridad industrial y protección ambiental.
14. NOM-028-STPS-2004, Organización del trabajo-seguridad en los procesos de sustancias químicas.
15. "Inspection practices for piping system components", API recommended practice 574, second edition, june 1998.
16. "Piping inspection code", Inspection, repair, alteration and rerating of in-service piping systems, API 570, second edition, october 1998.

Manuales

17. Manual de operación actualizado de la Planta de Alquilación, Instituto mexicano del petróleo.